

Test und Inbetriebnahme eines Setups zur Qualitätskontrolle der ITk-Pixel Outer Barrel Bare Module Cell

Nico Klein

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

11/ 2022

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn,
Datum

.....
Unterschrift

1. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Desch
2. Gutachter: Dr. Matthias Hamer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	ITk-Pixel Detektor am HL-LHC	2
2.1	LHC und HL-LHC	2
2.2	ATLAS-Experiment	4
2.2.1	Innerer Detektor	4
2.2.2	ITk-Detektor	4
2.2.3	ITk-Pixel Outer Barrel	6
3	Setup zur Qualitätskontrolle der Wärmeleitfähigkeit der Bare Cell	13
3.1	Aufbau	13
3.2	Einzelne Komponenten des Setups	16
3.2.1	Lastzelle	16
3.2.2	Heizkörper	16
3.2.3	Pt100	16
3.2.4	Peltier-Element	17
3.3	Ausleseelektronik des Setups	17
3.3.1	Auslese der Pt100 Temperatursensoren	19
3.3.2	Auslese der Lastzelle	19
3.4	Definition und Rechnungen mit dem TFM	19
3.4.1	TFM (Thermal Figure of Merit)	19
3.4.2	Berechnung der TFM im Setup	20
3.4.3	Effekte die Einfluss auf die TFM nehmen	21
4	Inbetriebnahme	22
4.1	ADC-Kalibration	22
4.2	Lastzelle	23
4.3	Widerstand-Kalibration in der Ausleseelektronik	27
4.4	GUI	28
4.5	Temperaturabhängigkeit der Kraft auf das DUT	29
4.6	Schwarzkörperstrahlung	31
5	Ergebnisse	34
5.1	Test Messung Aluminium ohne DUT	34
5.2	Soft-PGS	36

5.3	Verhalten der Messwerte des Setups unter verschiedenen Umständen	37
5.3.1	Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur der Kalorimeter . . .	37
5.3.2	TFM der Bare Cell bei Wiederholungsmessungen mit und ohne Soft-PGS . . .	39
5.3.3	Messungen mit und ohne Vakuum	40
5.4	Prototyp Bare Cell	41
6	Fazit und Ausblick	45
	Abbildungsverzeichnis	46

Einleitung

Der Large Hadron Collider (LHC) wird zum High Luminosity-Large Hadron Collider (HL-LHC) verbessert. Im Zuge dessen wird der aktuelle Innere Detektor (ID) des ATLAS-Experiments erneuert und durch den *Inner Tracker-Detektor* (ITk-Detektor) ersetzt. Dieser wird zum Teil aus Pixel-Detektor Modulen bestehen, welche auf einer Trägerstruktur, dem Bare Local Support, getragen werden.

In dieser Bachelorarbeit geht es um die Inbetriebnahme eines Setups zur Qualitätskontrolle, mit dem die Wärmeleitfähigkeit der Bare Cell überprüft werden soll, welche Teil des Bare Local Supports ist. Ihre Wärmeleitfähigkeit muss überprüft werden, da die Bare Cell auch eine kritische Rolle bei der Kühlung der ITk-Pixel-Module spielt.

Das Ziel der Arbeit ist ein Setup in Betrieb zu nehmen, mit dem 5% der circa 7000 an der Universität Bonn produzierten Bare Cells auf ihre Wärmeleitfähigkeit getestet werden. Hierzu müssen einige Kalibrationsarbeiten und Fehlerabschätzungen, sowie Tests mit Bare Cells durchgeführt werden, um die Funktionsfähigkeit des Setups sicherzustellen. Zudem soll ein Graphisches User Interface (GUI) erstellt werden, mit welchem das Setup leicht bedient und die Daten besser ausgelesen werden können.

Die Arbeit ist gegliedert in vier Abschnitte. Zuerst wird ein Überblick über das ATLAS-Experiment am LHC sowie den Inneren Detektor und dann am HL-LHC sowie den ITk-Pixel-Detektor gegeben. Danach wird auf den Aufbau des Setups zur Qualitätskontrolle der Bare Cells eingegangen und dessen Inbetriebnahme sowie die damit einhergehende Kalibration einiger Bauteile beschrieben. Zum Schluss werden dann einige Ergebnisse aus Testmessungen zur Überprüfung der Funktionalität des Setups gezeigt.

ITk-Pixel Detektor am HL-LHC

Im Folgenden wird der LHC und der ITk Pixel Detektor beschrieben. Die Informationen in diesem Kapitel sind vorrangig aus [1], der Design Übersicht des Bare Local Supports, und [2], privaten Kommunikationen mit M. Hamer.

2.1 LHC und HL-LHC

Der Large Hadron Collider (LHC) ist der leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt (s. Abb 2.1). Die mit ihm erreichbaren Kollisionsenergien der vorrangig in ihm beschleunigten Teilchen liegen bei 13 TeV für Protonen und bei 2.76 TeV pro Nukleon für Blei. Er gehört zum Kernforschungszentrum CERN und ist mit vier großen Experimenten, ATLAS, CMS, ALICE und LHCb ausgestattet. Diese Experimente liegen jeweils an Kollisionspunkten der zwei im LHC verbauten Strahlenröhren, an denen, die in den Strahlenröhren in entgegengesetzte Richtung beschleunigten, Hadronen zur Kollision gebracht werden.

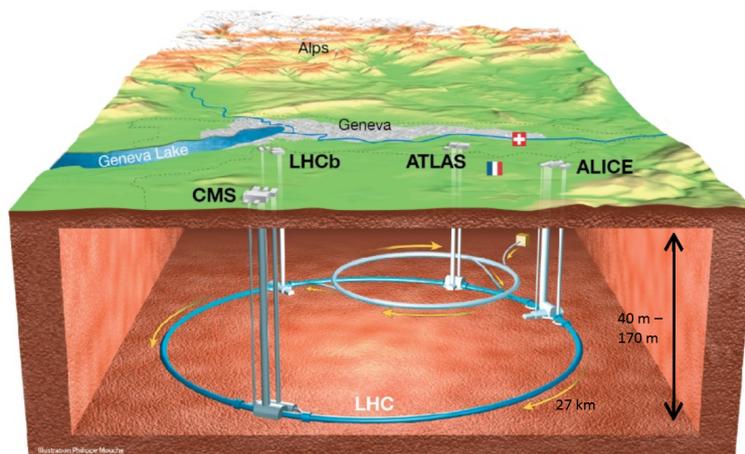


Abbildung 2.1: Der LHC und seine großen Experimente [3]

Diese Zusammenstöße von einzelnen Paketen (sogenannte Bunches), welche jeweils eine Teilchenwolke

sind, geschehen mit einer Frequenz von 40 MHz. Im Betrieb mit Protonen entstehen hierbei knapp 10^9 Proton-Proton Kollisionen jede Sekunde, was einer Luminosität von $10^{34} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}}$ entspricht [3].

Um seltene sowie bisher wenig verstandene Prozesse mit einer hohen Präzision zu messen, wird der LHC in einigen Jahren zum HL-LHC (High Luminosity-LHC) verbessert, wodurch die Luminosität um das 7,5-fache verbessert wird. Das hat zur Folge, dass über den Zusammenhang $\dot{N} = \sigma L$ mit dem Wirkungsquerschnitt σ und der Luminosität L die Kollisionsrate \dot{N} von 20-30 Proton-Proton-Kollisionen pro Paket-Kreuzung, auch genannt *Bunch Crossing*, zu circa 200 Proton-Proton Kollisionen pro Paket-Kreuzung erhöht wird.

Diese zusätzlichen Kollisionen erhöhen die erhaltene Datenmenge aus einer Paket-Kreuzung, wodurch sich mehr Prozesse beobachten lassen, welche dann auf seltene Prozesse untersucht werden können. Die aktuellen Detektoren sind nicht mehr für eine so hohe Zahl an Ereignissen ausgelegt. Dies gilt insbesondere für den Tracking-Detektor, welcher an mehreren Punkten scheitert, wie zum Beispiel der erhöhten Strahlendosis, der Schnelligkeit der Datenübertragung, die bei einer so hohen Menge an Teilchen und somit auszuwertenden Daten anfällt, oder der Genauigkeit, mit der die Teilchen lokalisiert werden können.

Aus diesem Grund wird der ATLAS-Detektor (s. Abb.2.2) überholt und erneuert, was insbesondere für den Inneren Detektor des ATLAS gilt, welcher durch den ITk-Pixel Detektor ersetzt wird.

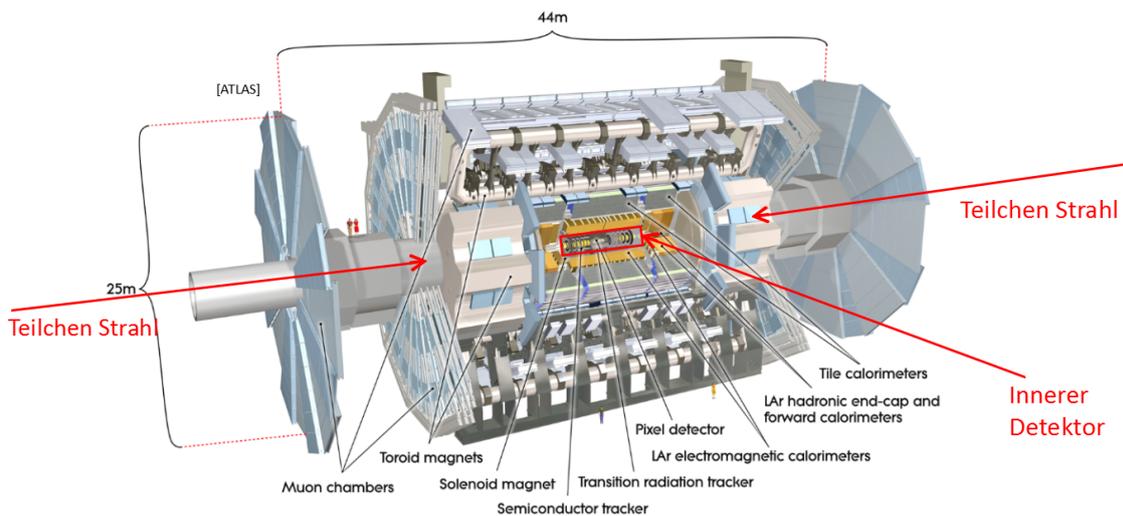


Abbildung 2.2: Das ATLAS-Experiment mit seinen einzelnen Detektoren [3]. Angefangen mit den äußeren Myonen Kammern, zur Detektion von Myonen, den Toroiden und Spulen Magneten, zur Ablenkung geladener Teilchen, aus deren Flugbahn die Ladung bestimmbar ist, den Kalorimetersystemen zur Bestimmung der Energie und des Impulses von elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen sowie der Energie von Hadronen und dem Inneren Detektor, welcher vor allem Ursprung, Impuls und Flugbahn der Teilchen bestimmt.

2.2 ATLAS-Experiment

2.2.1 Innerer Detektor

Der aktuelle Innere Detektor des ATLAS-Experiments ist in Abb. 2.3 zu sehen. Er besteht aus IBL-Detektor, Pixel-Detektor, Semiconductor Tracker (SCT) und Transition Radiation Tracker (TRT).

Der Pixel-Detektor und der IBL-Detektor bestehen aus Silizium-Pixel-Detektoren, während der SCT aus vier Schichten Silizium-Streifen-Detektoren besteht. Der TRT ist aus gasgefüllten Röhrchen gebaut, in denen das Gas durch die bei der Kollision entstehenden Teilchen ionisiert wird. All diese unterschiedlichen Detektoren sorgen dafür, die Spur der Teilchen verfolgen zu können.

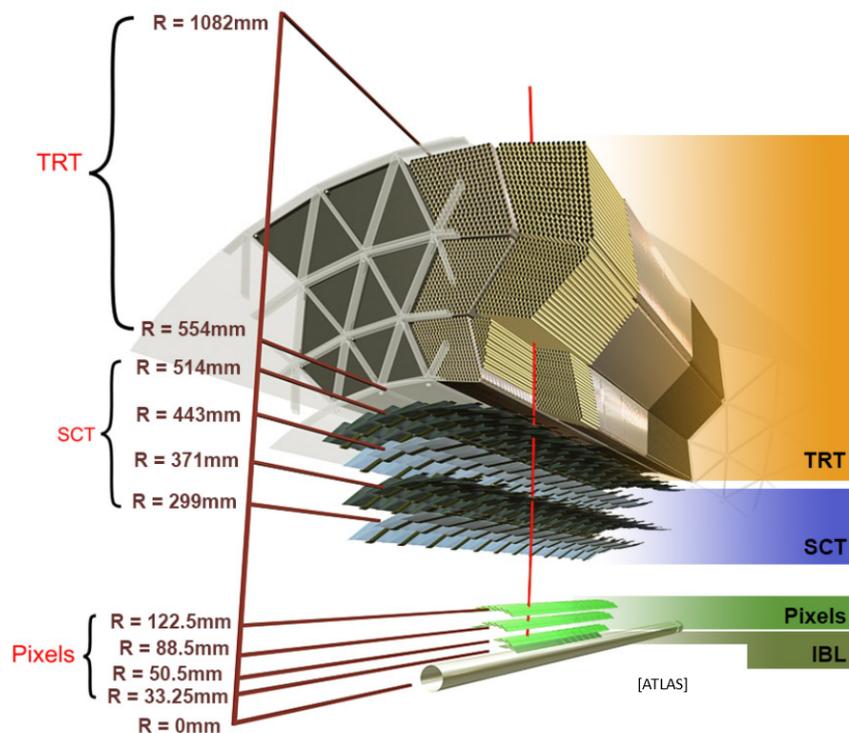


Abbildung 2.3: Der Innere Detektor des ATLAS-Experiments [3]

Der ATLAS Innere Detektor ist für den Betrieb am LHC angepasst und erfüllt aus den in Kapitel 2.1 genannten Gründen nicht mehr die Voraussetzungen für einen Betrieb am HL-LHC. Daher wird der Innere Detektor für den Betrieb am ATLAS-Experiment im HL-LHC verbessert. Der neue Innere Detektor wird der Inner Tracker-Detektor (ITk-Detektor) sein, welcher vollständig aus Silizium-Pixel-Detektoren und Silizium-Streifen-Detektoren bestehen wird.

2.2.2 ITk-Detektor

Der ITk-Detektor wird vollständig aus Silizium-Halbleiter-Sensoren bestehen. Sein Aufbau ist schematisch in Abb. 2.4 zu sehen und ist spiegelsymmetrisch zu $Z=0$ und zentralsymmetrisch zu ϕ .

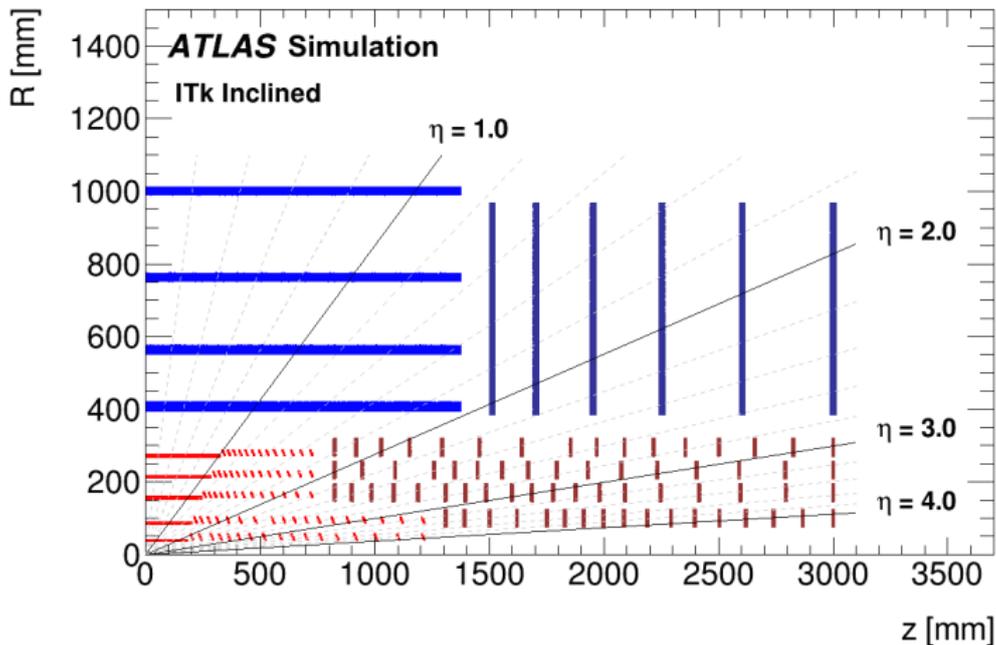


Abbildung 2.4: Aufbau des ITk-Detektors. In rot ist der ITk-Pixel-Detektor und in blau ist der ITk-Streifen-Detektor dargestellt [4]

Der Detektor besteht aus 9 Lagen, von denen 5 dem Pixel-Detektor angehören und 4 weitere ITk-Streifen-Detektoren sind. Der ITk-Streifen-Detektor besteht aus längeren Silizium-Streifen-Modulen, welche kostengünstig hergestellt werden können, während der ITk-Pixel-Detektor aus feiner segmentierten Silizium-Detektor-Chips besteht.

Der Pixel-Detektor ist zudem in drei Abschnitte unterteilt wie in Abb. 2.5 zu sehen. Er besteht aus dem Inner System, dem Outer Barrel und den beiden Outer Endcaps. Das Outer Barrel besteht aus den drei Äußeren der fünf Lagen des ITk-Pixel Detektors. Diese werden zum Teil zylindrisch um die Kollisionsstelle aufgebaut (der sogenannten *Flat Section*), wie in Abb. 2.6 zu sehen, und zum Teil in Kreisringen aufgebaut (der sogenannten *Inclined Rings Section*), wie in Abb. 2.7 zu sehen.

Der Unterschied vom Inner System und dem Outer Barrel besteht vor allem in der Wahl der Pixel Module. In der ersten Lage des Inner Systems werden Modul-Triplets verwendet, welche aus 3D-Sensoren bestehen, während in der zweiten Lage Quad-Module verwendet werden, die einen $100\mu\text{m}$ dicken Sensor besitzen. Der Unterschied zum Outer Barrel besteht darin, dass die Quad-Module des Outer Barrels eine Sensor Dicke von $150\mu\text{m}$ besitzen. Die unterschiedliche Wahl der Sensor Dicke entsteht daher, dass so wenig Material wie möglich in der Nähe der Kollisionsstelle zwischen den verschiedenen Detektoren sein soll, um die Teilchen ungehindert passieren zu lassen, sowie einer besseren Strahlenhärte der dünneren Sensoren.

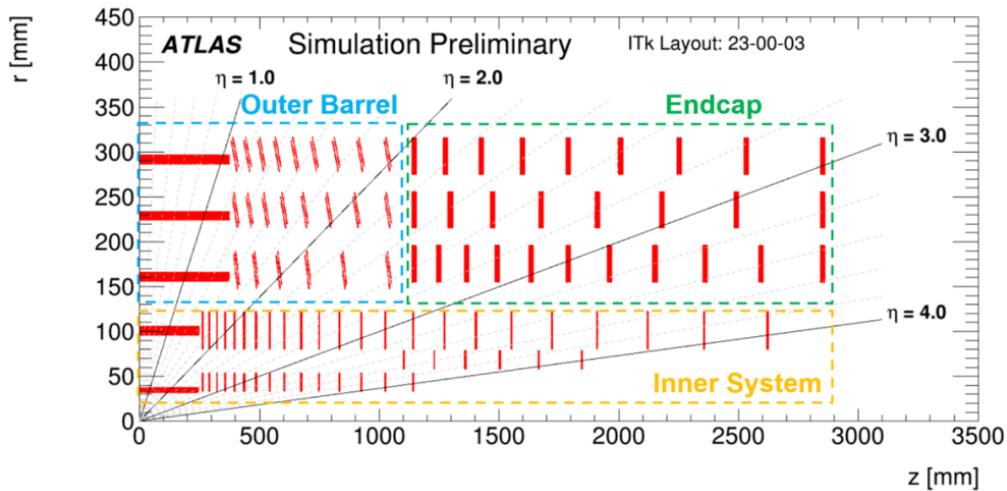


Abbildung 2.5: Aufteilung des ITk-Pixel Detektors [1] in das Inner System, das Outer Barrel und die Endcap

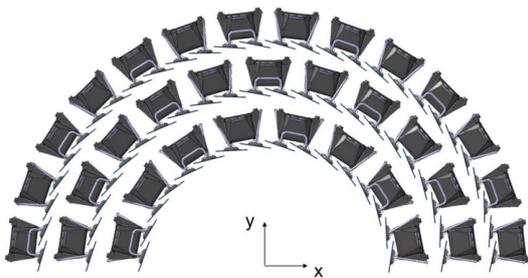


Abbildung 2.6: Halbierte Anordnung der Quad-Module in zylindrischer Ausrichtung im Outer Barrel (*Flat Section*) [1]

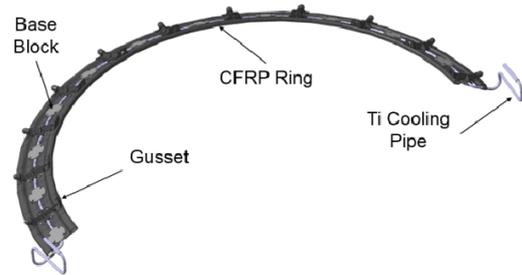


Abbildung 2.7: Halbierte Anordnung der Quad-Module in Kreisring Ausrichtung im Outer Barrel (*Inclined Rings Section*) [1]

2.2.3 ITk-Pixel Outer Barrel

Local Support

Die ITk-Pixel-Module im Outer Barrel in der Flat und der Inclined Rings Section werden von sogenannten Local Support Strukturen getragen. Sie bestehen überwiegend aus einem Karbongerüst, welche als Trägerstrukturen dienen auf denen die Pixel-Module angebracht werden. Da die Module gekühlt werden müssen, ist zwischen den Modulen und dem Karbongerüst eine Kühlröhre (im folgenden Cooling Pipe genannt) angebracht (s. Abb. 2.8 in der Flat Section). Um den Abtransport der Wärme zu verbessern und die Module auf dieser zu befestigen, ist auf die Cooling Pipe ein Base Block gebaut. Auf diesen wird eine Bare Cell (s. Abschnitt 2.2.3) aufgeschraubt, welche mit dem ITk-Pixel-Modul verklebt wird und den Wärmeabtransport vom Modul zur Cooling Pipe garantieren soll. Damit hierbei so wenig Kühlleistung wie möglich verloren geht, wird zwischen dem Base Block und der Bare Cell ein Thermales Interface Material eingebaut. In diesem Fall wird als Thermales Interface Material Soft-PGS verwendet (s. Abb. 2.9).

Das Soft-PGS ist ein Graphitplättchen, welches eine druckabhängige Wärmeleitfähigkeit besitzt, wie

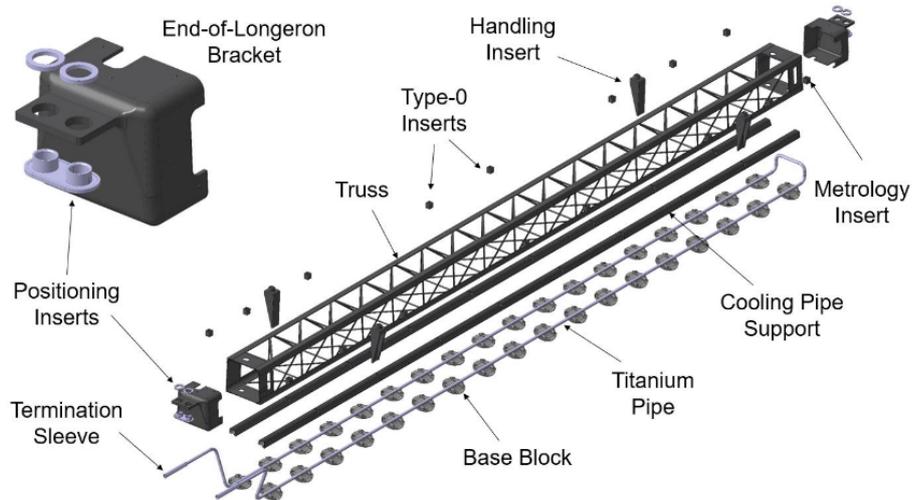


Abbildung 2.8: Outer Barrel Bare local Support der Flat Section Explosionszeichnung [1]

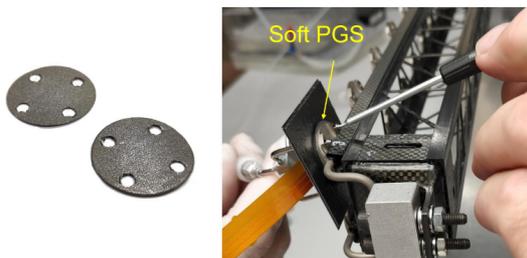


Abbildung 2.9: Soft-PGS auf dem Bare local Support [1]

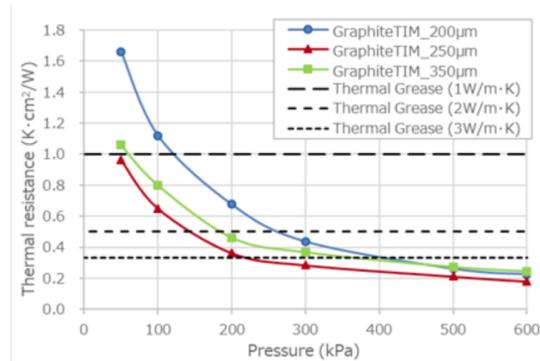


Abbildung 2.10: Veränderung des Wärmewiderstands des Soft-PGS unter Druck [5]

in Abb. 2.10 zu sehen. Durch diese Eigenschaft eignet es sich als Füllmaterial zwischen dem Base Block und dem Cooling Block der Bare Cell. Im Gegensatz zu Wärmeleitpaste verschleißt es kaum und erreicht eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit [5]. Zudem ist es kompressibel, was die Entstehung von Lücken und Luftblasen zwischen dem Base und dem Cooling Block verringert und somit die Wärmeleitfähigkeit weiter erhöht.

In Abb. 2.11 ist ein Local Support für die Inclined Rings Section gezeigt. Vom Grundsatz her ist der Aufbau der gleiche, mit einem nun kreisförmigen Karbongerüst und dem gleichen Kühlsystem. Jedoch gibt es einen Unterschied in der Ausrichtung der ITk-Pixel-Module, welche nun abwechselnd nach vorne und hinten zeigend auf dem Local Support angebracht sind.

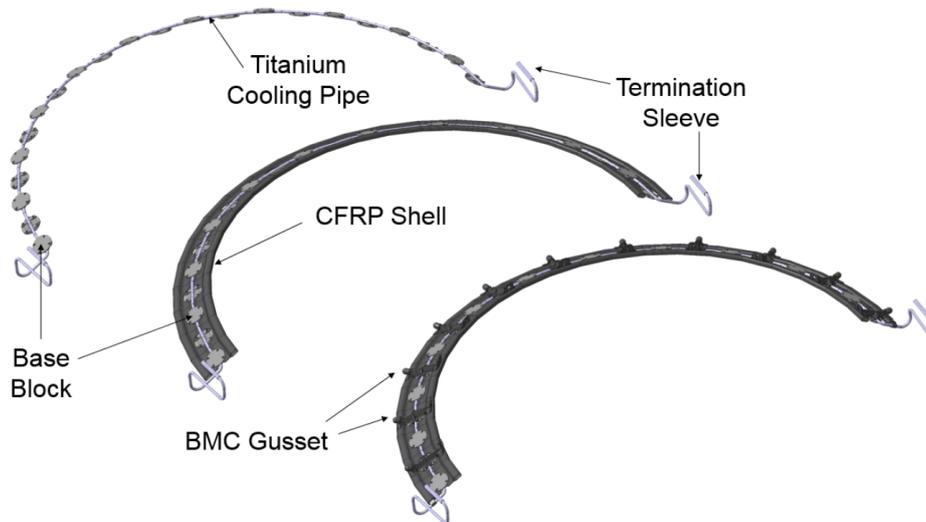


Abbildung 2.11: Outer Barrel Bare Local Support der Inclined Rings Section Explosionszeichnung [1]

Leistungsverteilung auf dem ITk-Pixel-Modul

Die Kühlung der ITk-Pixel-Module gelingt über die Cooling Pipe, welche durch die Bare Cell mit dem Modul verbunden ist. Die Cooling Pipe wird mit flüssigem CO₂ gekühlt, welches beim Erhitzen durch den Wärmeabtransport aus den ITk-Pixel-Modulen gasförmig wird und somit zusätzlich Verdampfungsenergie aufnehmen kann. Um dies zu erreichen, wird das CO₂ mit einer Temperatur von -35 °C in die Cooling Pipe geleitet. Hierdurch sollen die ITk-Pixel-Module auf mindestens -10 °C abgekühlt werden.

Für die Temperaturverteilung auf dem Modul ist vor allem die Leistung verantwortlich, die das Modul an jedem Punkt verbraucht. Der simulierte Leistungsverbrauch der Module ist Abb. 2.12 zu sehen.

Der Leistungsverbrauch der Module ist in der Peripherie hoch, da an diesem Punkt die Spannungsregler verbaut sind, über die knapp 40%, der auf der gesamten Fläche abfallenden Leistung, abfällt, während der Rest des Chips einen relativ konstanten Leistungsverbrauch hat. Auf die Fläche gerechnet entspricht die Leistungsdichte in der Peripherie knapp dem sechsfachen der Leistungsdichte auf der Detektorfläche. Die Kühlung ist durch die Position der Cooling Pipe jedoch auf die Mitte des Moduls konzentriert, wodurch der Wärmeabtransport aus der Peripherie erschwert ist. Damit dieser dennoch gelingt, ist die Bare Cell zwischen Cooling Block und Modul angebracht, welche im nächsten Abschnitt genauer beschrieben wird.

Outer Barrel Bare Cell

Die Bare Cell besteht aus 3 Komponenten, dem Cooling Block, einer Pyrolytischen Graphit Platte und einem Zweikomponentenkleber, welcher die beiden ersten Komponenten zusammenklebt. Sie ist in Abb. 2.13 zu sehen.

Der Cooling Block besteht aus einer Aluminium-Graphit-Komposition und hat eine Dicke von $(0,725 \pm 0,05)\text{mm}$. Zudem hat er eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit von $180 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [1]. Er besitzt vier Beinchen mit Gewinden, an denen er mit dem Base Block der Cooling Pipe verschraubt werden kann.

Um für einen gleichmäßigen Wärmeabfluss vom ITk-Pixel-Modul zur Cooling Pipe zu sorgen, ist die

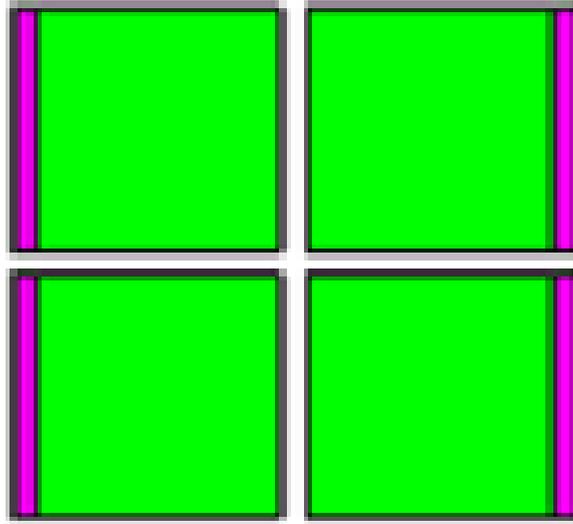


Abbildung 2.12: Leistungsverteilung eines ITk-Pixel-Moduls [1]. In den pinken Bereichen in der Peripherie sind die elektronischen Bauteile wie Spannungsregler verbaut, welche 40% der Leistung verbrauchen, während im grünen Bereich die Detektorflächen der Chips liegen.

Pyrolytische Graphit Platte vorhanden. Diese hat eine Dicke von circa 0,6mm und eine Wärmeleitfähigkeit von $1500 - 1700 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ in X-Y-Richtung. In Z-Richtung beträgt die Wärmeleitfähigkeit nur $7 - 20 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$, was jedoch kaum negativ in den Wärmeabtransport einfließt, da die Pyrolytische Graphit Platte sehr dünn ist und vor allem für den Abfluss der Wärme aus der Peripherie sorgen soll [1] (s. für das Koordinatensystem 2.13). Das Material ist rau und besitzt eine ungleichmäßige Oberfläche.

Um den Cooling Block und die Pyrolytische Graphit Platte zu verbinden, wurde ein Zweikomponentenkleber verwendet, welcher nominell eine Wärmeleitfähigkeit von $1,4 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ hat [1]. Die thermische Resistenz des Klebers kann jedoch stark variieren, da diese auch von der Mischung und Vermischung des Zweikomponentenklebers sowie der Auftragung zwischen den Materialien abhängt. Zudem kann die Dicke des Klebers variieren, wodurch sich seine thermische Resistenz verändern kann. Die thermische Resistenz oder TFM (Thermal Figure of Merit) ist eine Möglichkeit die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes zu beschreiben und lässt sich mit $\text{TFM} = \frac{l}{\lambda}$ berechnen, wobei $\lambda = \frac{P \cdot l}{A \cdot \Delta T}$ die Wärmeleitfähigkeit ist und l die Länge des Materials. Sie wird in Kapitel 3.4.1 genauer hergeleitet.

Temperaturverteilung eines ITk-Pixel-Moduls in vollem Betrieb

Aus den vorherigen Kapiteln geht hervor, dass die Performance der Bare Cell einen entscheidenden Teil in der Kühlung der ITk-Pixel-Module hat. Die Performance der Bare Cell in der Temperaturleitung der ITk-Pixel-Module in vollem Betrieb ist in Abb. 2.14 für ein Benchmark-Szenario zu sehen.

Wie zu sehen ist, bleibt die Temperatur des Moduls überall unter -10°C und erfüllt somit die erwarteten Anforderungen. Jedoch ist klar zu erkennen, dass es einen starken Temperaturanstieg zur Peripherie hin gibt. Das ist zu erwarten, da die meiste Leistung, wie weiter oben beschrieben, vor allem in der Peripherie verbraucht wird. Ebenfalls kann daraus geschlossen werden, dass die Kühlmethode über die Cooling Pipe und die Bare Cell zwar funktioniert, jedoch die Eigenschaft hat, dass sie vorrangig in der Mitte des ITk-Pixel-Moduls gekühlt wird und somit die Temperatur der Peripherie besonders beachtet

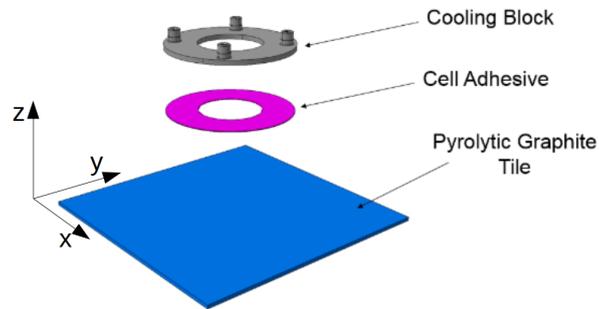


Abbildung 2.13: Outer Barrel Bare Module Cell Explosionszeichnung [1]

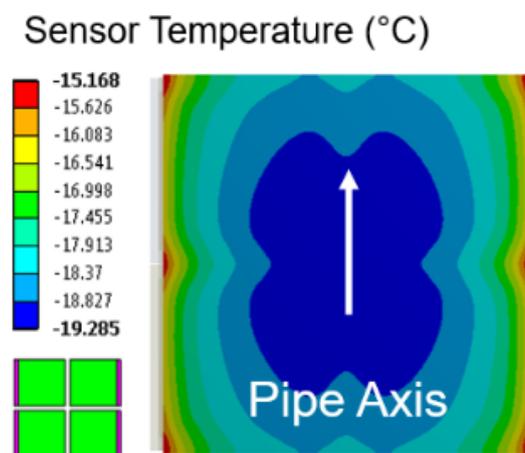


Abbildung 2.14: Temperaturverteilung eines ITk-Pixel-Moduls in einem Benchmark-Szenario [1]

werden muss.

Um die Anfälligkeit der Kühlung auf Fehler in der Produktion zu verdeutlichen, ist in Abb. 2.15 eine Temperatur Simulation mehrerer Module zu sehen. Hierbei ist vor allem die Spalte mit $T_{\max,FE \text{ Periphery}}$ interessant, da diese die maximale Temperatur der Peripherie der ITk-Pixel-Module darstellt. In der oberen Hälfte der Tabelle sind Module mit guten Leistungsverbrauchswerten simuliert und im unteren Teil der Tabelle sind ITk-Pixel-Module simuliert, welche am unteren Ende der erwarteten Fertigungstoleranz liegen. Wenn man sich nun die maximalen Temperaturen der Peripherie ansieht, fällt auf, dass diese bei den verschlechterten Modulen weit über den geplanten -10°C liegen. Da solche Module jedoch auch im späteren ITk-Detektor verbaut werden, ist es nötig, dass das Kühlsystem präzise funktioniert, um diese erhöhten Temperaturen nicht weiter zu verschlimmern.

Kritische Beiträge zur thermischen Performance der Bare Cell

Aus dem vorherigen Abschnitt geht hervor, dass aus der Produktionstoleranz für die ITk-Pixel-Module auch Module entstehen können, welche in vollem Betrieb höhere Temperaturen als -10°C erreichen. Da die Kühlung der Module vor allem von der Übertragung der erzeugten Wärme des Moduls an die

$T_{CO_2} = -35^\circ C$			Worst FE Periphery		
Type-0 Power on Module [%]		Case	$T_{min,FE}$ Periphery [°C]	$T_{max,FE}$ Periphery [°C]	$T_{Av,FE}$ Periphery [°C]
100 (uniform)	Longeron Cell: Nominal Properties	1	-17.490	-16.674	-17.101
		2	-15.871	-13.322	-14.447
		3	-14.095	-9.738	-11.605
		4	-11.751	-6.971	-9.059
		5	-9.986	-3.336	-6.193
100 (uniform)	Longeron Cell: Degraded Properties	1	-10.338	-9.473	-9.928
		2	-8.753	-6.104	-7.280
		3	-6.701	-2.156	-4.114
		4	-3.301	1.723	-0.485
		5	-1.480	5.500	2.483

Abbildung 2.15: Temperatur Simulation eines ITk-Pixel-Moduls [1]

Cooling Pipe abhängt, ist die Bare Cell ein entscheidender Faktor.

Aus dem obigen Abschnitt, der die Bare Cell behandelt, ist bekannt, dass der Zweikomponentenkleber

eine hohe Varianz der thermischen Resistenz aufweist, was auf dessen Dicke, Auftragung und Anmischung zurückzuführen ist.

Wegen der Variabilität der thermischen Resistenz des Klebers wird die Dicke der Bare Cell in einem Metrologiebericht erfasst, um Module mit einer zu dicken Klebschicht auszusortieren. Hiermit kann jedoch nicht festgestellt werden, wie die Auftragung oder Anmischung des Klebers funktioniert hat. Daher soll die Wärmeleitfähigkeit des Klebers sowie der Bare Cell selbst bei 5% der Zellen überprüft werden, um Fehler bei der Anmischung des Klebers frühzeitig in der Produktionskette zu identifizieren.

Setup zur Qualitätskontrolle der Wärmeleitfähigkeit der Bare Cell

Im Folgenden wird das Setup zur Qualitätskontrolle der Wärmeleitfähigkeit der Bare Cell und seine einzelnen Komponenten beschrieben. Hierbei wird zuerst auf den Aufbau und dann in einzelnen Abschnitten auf die jeweiligen Bauteile eingegangen. Des Weiteren wird der Aufbau der Ausleseelektronik und die Berechnung der TFM (Thermal Figure of Merit) aus den erhaltenen Werten dargestellt.

3.1 Aufbau

Das Setup zur Qualitätskontrolle der Wärmeleitfähigkeit der Bare Cell ist in Abb. 3.1 als Konstruktionszeichnung und in Abb. 3.2 in seiner final aufgebauten Form dargestellt. Das Setup besteht aus einem Kalorimeter (5), welches auf einem Gerüst (1) gelagert ist. Das Kalorimeter besteht aus zwei Aluminiumstäben und zwei Aluminiumblöcken mit der Aluminiumsorte *AlMgSi1*. Der Stab hat jeweils die Form eines Zylinders mit einem Radius von $(1 \pm 0,1)$ cm und einer Höhe von $(8,09 \pm 0,01)$ cm, während der Block eine Höhe von $(0,5 \pm 0,01)$ cm und eine Tiefe sowie eine Breite von $(5,205 \pm 0,005)$ cm hat. Die Messfehler dieser Werte sind auf die Genauigkeit eines Messschiebers, der zur Messung verwendet wurde, zurückzuführen.

Um den oberen beweglichen Teil des Kalorimeters (5) zu tragen, besteht das Gerüst aus vier Stelzen, an denen zwei Plattformen befestigt sind, wobei die untere von beiden frei beweglich ist und aus Plastik besteht, während die obere feststehend und aus Messing ist. In die Messing-Platte ist eine Schraube eingebaut, mit welcher Druck auf den oberen Aluminiumstab ausgeübt werden kann. Damit der Druck bei Änderung der Temperatur nicht durch die Längenänderung des Aluminiums bestimmt wird, sondern unabhängig bleibt, ist zusätzlich eine Feder eingebaut, um dies abzufangen. Um den ausgeübten Druck zu messen, ist eine Lastzelle (3 und s. Abschnitt 3.2.1) zwischen Schraube und Kalorimeter angebracht.

Dem System wird Wärme durch einen Heizkörper (4 und s. Abschnitt 3.2.2) hinzugeführt, welcher auf den Aluminiumblock des Kalorimeters aufgeklebt ist. Um den Wärmeabfluss vom Heizkörper in die Umgebung zu minimieren, ist zwischen Heizkörper und Lastzelle ein Plastikplättchen eingefügt, welches die Wärmeleitung sowie die Abstrahlung vom Heizkörper selbst verringert.

In die Aluminiumstäbe sind jeweils zwei Pt100 Temperatursensoren (6 und s. Abschnitt 3.2.3) eingebaut, welche in gebohrte Öffnungen geschoben werden. Um die Wärmeleitung zwischen dem Aluminium und dem Pt100 zu erhöhen, wird zwischen ihnen Wärmeleitpaste eingesetzt. Die Temperatursensoren sind in

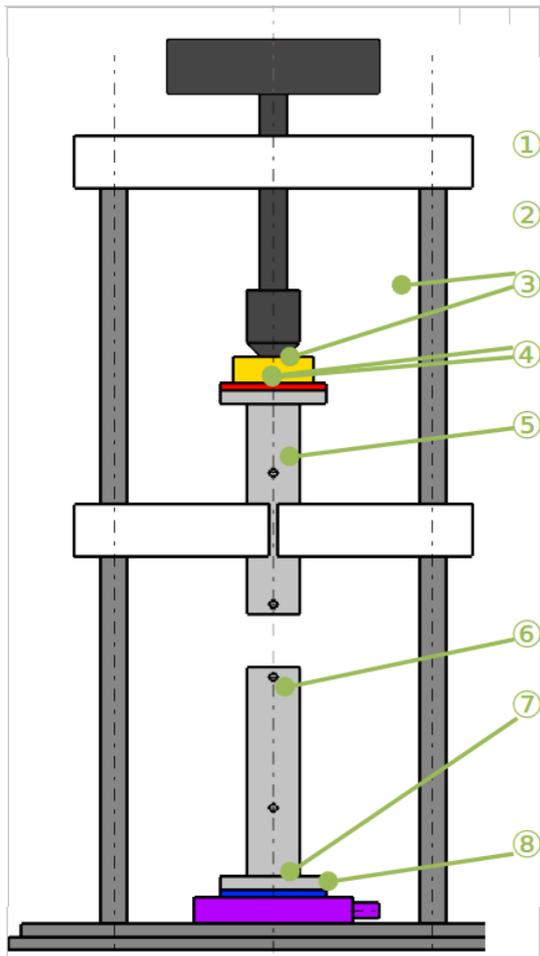


Abbildung 3.1: Konstruktionszeichnung des Setups zur Qualitätskontrolle der Bare Cells [1]

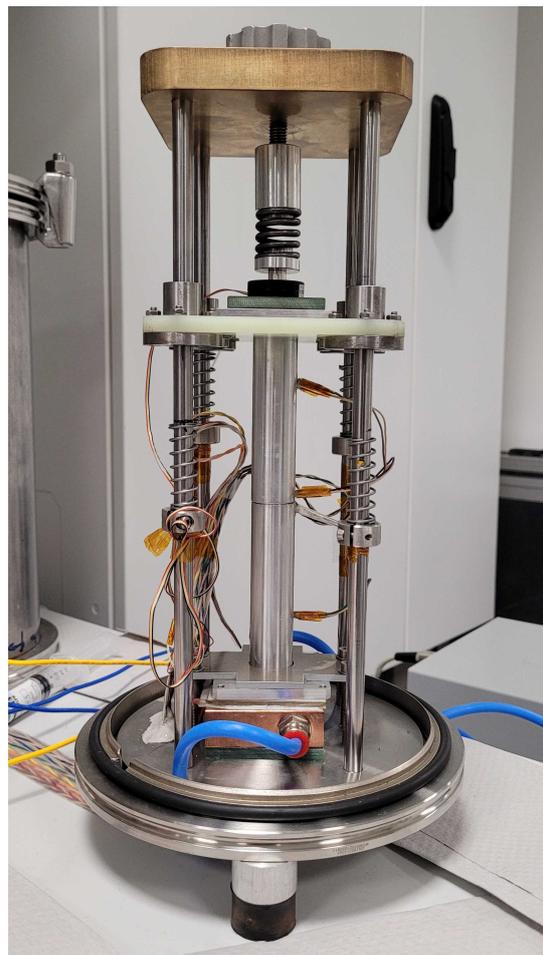


Abbildung 3.2: Bild des finalen Aufbaus des Setups

den jeweiligen Stäben ($5 \pm 0,01$)cm voneinander und von der Mitte jeweils ($0,34 \pm 0,02$)cm entfernt. Der untere Aluminiumstab besitzt zudem auf der oberen Seite des Zylinders weitere vier Bohrungen, um den mit vier Pins versehenen Cooling Block (s. Kapitel 2.2.3) einbauen zu können.

Mit den Informationen der Leistung und der Temperaturdifferenz kann die Wärmeleitfähigkeit sowie die TFM der Aluminiumstäbe berechnet werden. Die Rechnung hierzu ist in Abschnitt 3.4.1 und 3.4.2 aufgeschlüsselt.

Um das untere Kältereservoir zu erzeugen, ist ein Peltier-Element (7 und s. Abschnitt 3.2.4) verbaut, welches an seiner warmen Seite mit einem wassergekühlten Kühlblock (8) auf 20°C gehalten wird. Zur Wasserkühlung wird dabei ein Julabo FP50 Chiller verwendet. Dies ist notwendig, da das Peltier-Element nur Temperaturdifferenzen erzeugen kann und somit eine stabile Temperatur auf der warmen Seite benötigt. Das Peltier-Element sowie auch der Heizkörper werden über ein Rohde & Schwarz HMP4040 Netzgerät mit Strom versorgt.

Um äußere Einflüsse auf das Setup zu minimieren und somit die Reproduzierbarkeit zu erhöhen, wird das Setup in einem Vakuum betrieben. Genauer wird der Unterschied den der Vakuumbehälter auf die

Reproduzierbarkeit hat in Kapitel 5.3.3 untersucht. Zusätzlich hierzu verhindert der geringe Luftdruck, dass an den bis zu -10°C kalten Aluminiumstäben kein Wasser kondensiert oder gefriert.

Der Vakuumbehälter ist in Abb. 3.3 zu sehen und besteht ebenfalls aus Aluminium. Seine Grundform ist die eines Aluminium-Zylinders mit Radius $(0,0812 \pm 0,0001)\text{m}$ und Höhe $(0,317 \pm 0,001)\text{m}$. Ein Dichtring verdichtet die Metallränder des Behälters mit dem Boden sowie dem Deckel, welche mit Klemmen fixiert werden. Hinzu kommen weitere drei zylindrische, orthogonal zur Grundform orientierte Bereiche.

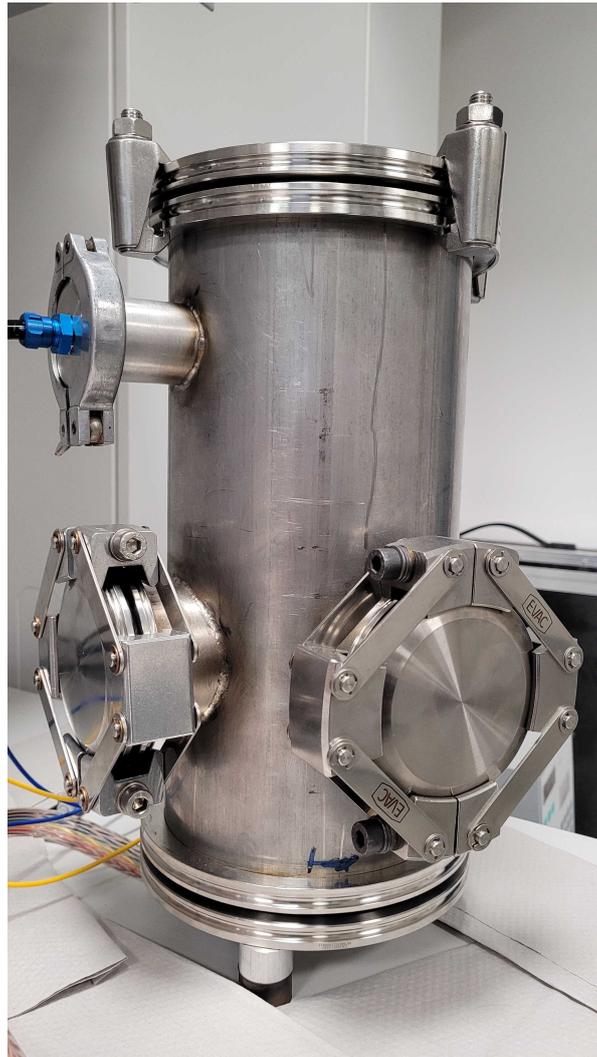


Abbildung 3.3: Das Setup mit Vakuumbehälter

3.2 Einzelne Komponenten des Setups

3.2.1 Lastzelle

Die im Setup verwendete Lastzelle wird mit einem Piezo Kristall betrieben. Bei einem Piezo Kristall handelt es sich um einen Kristall, welcher durch Verformung elektrische Spannung aufbaut. Hierbei entsteht durch die makroskopische Verformung des Kristalls eine Verschiebung von mikroskopischen Dipolen im Kristall. Wenn alle diese entstehenden Dipole aufsummiert werden, ist eine elektrische Spannung zu messen [6].

Da es sich nur um eine Dipolverschiebung handelt, ist die beim Verformen des Kristalls entstehende Spannung sehr gering und wird deswegen häufig verstärkt. Dies ist ebenfalls in der verwendeten Lastzelle der Fall, weshalb diese mit unterschiedlichen Eingangsspannungen gespeist werden kann ohne den linearen Zusammenhang zwischen Gewicht und Ausgangsspannung zu verändern. Das Ersatzschaltbild für die Lastzelle ist in Abb. 3.4 zu sehen.

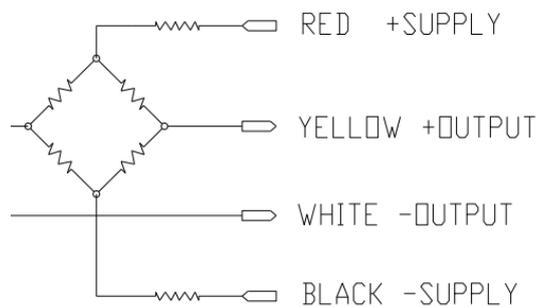


Abbildung 3.4: Stromkreis der Lastzelle [7]

3.2.2 Heizkörper

Der verwendete Heizkörper besteht aus einem Kupferdraht mit einem elektrischen Widerstand von 72Ω . Durch Anlegen einer Spannung kann mit $P = U \cdot I$ die durch den Heizkörper erzeugte Leistung errechnet werden, welche dann als Heizleistung an die Umgebung abgegeben wird.

3.2.3 Pt100

Ein Pt100 Temperatursensor besteht aus einem elektrisch abgeschirmten Platindraht, welcher durch den Bereich gelegt ist, an dem die Temperatur gemessen werden soll. Da Platin ein PTC, auch Kaltleiter genannt, ist, ist sein Widerstand abhängig von der Temperatur, was in diesem Fall eine Erhöhung des Widerstands bei höheren Temperaturen bedeutet. Das liegt daran, dass durch die erhöhten Temperaturen die Atome im Gitter des Leiters beginnen zu schwingen und damit die Bewegungen der Elektronen behindern.

Um die Temperatur des Drahtes zu bestimmen, wird der Widerstand ermittelt und über Abgleich mit einer Kalibrationskurve dann die Temperatur. Die Kalibrationskurve für Platin ist in Formel 3.1 gegeben. Hierbei ist $R_0 = 100\Omega$, R der gemessene Widerstand und die beiden Konstanten sind $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ und $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ [8].

$$T = \frac{-AR_0 + \sqrt{(AR_0)^2 - 4BR_0 \cdot (R_0 - R)}}{2BR_0} \quad (3.1)$$

3.2.4 Peltier-Element

Ein Peltier-Element besteht aus zwei Arten von Halbleitern, einem n- und einem p-dotierten Halbleiter, von denen mehrere über Kupferbrücken miteinander verbunden sind. Hierbei sind die Halbleiter so wie in Abb. 3.5 angeordnet.

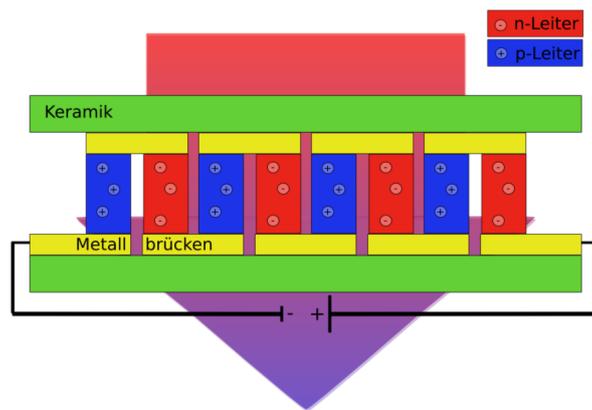


Abbildung 3.5: Schematische Zeichnung eines Peltier-Elements [9]

Der Peltier-Effekt basiert auf den Energieniveaus der beiden n- und p-Halbleiter. P-Halbleiter haben durch ihre Dotierung höhere Energieniveaus als n-Halbleiter. Wenn nun an eine Verbindung der beiden Halbleiter eine Spannung angelegt wird, dann müssen die Elektronen, welche vom n-Halbleiter in den p-Halbleiter gelangen, diese Energiebarriere überwinden. Hierzu müssen sie Energie aufnehmen. Diese Energie wird aus dem Material als Wärmeenergie abgezogen. Wenn die Elektronen dann wieder aus dem p-Halbleiter austreten, geben sie die zusätzliche Energie ab und erwärmen somit die andere Seite des p-Halbleiters.

Wenn nun eine Spannung an das Peltier-Element wie in Abb. 3.5 angelegt wird, wird die untere Seite gekühlt, während die obere sich erwärmt [10].

Durch diese Technik lässt sich jedoch nur eine Temperaturdifferenz erzeugen, wobei zur optimalen Nutzung eine der beiden Seiten auf einer konstanten Temperatur gehalten werden muss. Dies geschieht häufig über Luft- oder Wasserkühlungen.

3.3 Ausleseelektronik des Setups

Die Ausleseelektronik ist auf mehreren Lötbretern aufgebaut, wie in Abb. 3.6 zu erkennen und mit Kabeln an ADCs (Analog-to-Digital Converter) verbunden. In diesem Aufbau werden 16-Bit ADCs verwendet. Mit den ADCs werden die im Setup zu messenden Spannungen bestimmt, welche dann zur Datenverarbeitung an einen *Raspberry pi* gesendet werden, wobei hier ein *Raspberry pi 2 Model B V1.1* verwendet wird.

Dieser Aufbau ist zweckmäßig, jedoch führt er zu Ungenauigkeiten in der Auslese, da es in den Kabeln durch mechanische Bewegung oder ähnlichem zu Spannungsschwankungen kommen kann.

In den folgenden Abschnitten werden die Spannungsmessungen der Pt100 Temperatursensoren und der Lastzelle beschrieben.

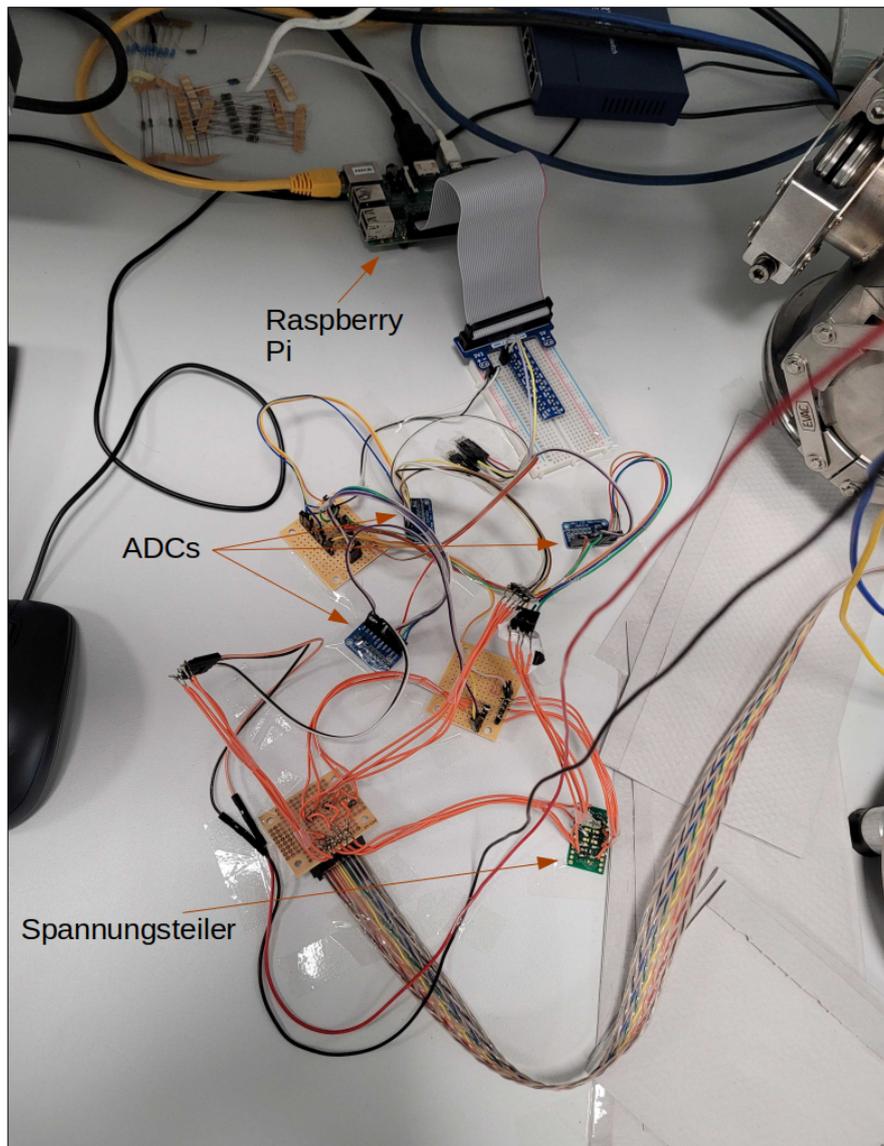


Abbildung 3.6: Bild des Aufbaus der Ausleseelektronik

3.3.1 Auslese der Pt100 Temperatursensoren

Die Temperatúrauslese der Pt100 Temperatursensoren ist, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, über die Messung des Widerstandes des Platindrahts erreichbar. Um diesen zu bestimmen, wird ein Spannungsteiler verwendet, wobei der Pt100 ein Widerstand darstellt, während für den anderen ein 100Ω Widerstand verwendet wird. Durch Messung, der über den Pt100 abfallenden Spannung, ist dann mit der Spannungsteiler Formel 3.2 der Widerstand des Pt100 bestimmbar.

$$R_{\text{Pt100}} = \frac{U_{\text{Pt100}} \cdot R_{100\Omega}}{U_{\text{Gesamt}} - U_{\text{Pt100}}} \quad (3.2)$$

Die Messung der Spannung geschieht über zwei ADCs, wobei die Versorgungsspannung der Spannungsteiler wie für die ADC's auch von der 3,3V-Schiene des *Raspberry pi* geliefert wird.

3.3.2 Auslese der Lastzelle

In Abschnitt 3.2.1 wird beschrieben, dass die Lastzelle eine Spannungsquelle zur Verstärkung der durch den Piezo Kristall entstehenden Spannung, benötigt. Zusätzlich dazu muss die ausgegebene Spannung der Lastzelle bestimmt werden.

Die Lastzelle ist bis zu einem Gewicht von 50kg ausgelegt und kann zwischen 16-24 $\frac{\text{mV}}{\text{V}}$ an Spannung, bei einer Eingangsspannung von bis zu 5V, ausgeben [7].

Die Lastzelle wird über das verwendete Rohde&Schwarz HMP4040 Netzgerät mit 5V Spannung versorgt und mit einem ADC wird die ausgegebene Spannung gemessen.

3.4 Definition und Rechnungen mit dem TFM

3.4.1 TFM (Thermal Figure of Merit)

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes wird die Formel 3.3 verwendet

$$\lambda = \frac{P \cdot l}{A \cdot \Delta T} \quad (3.3)$$

Hierbei ist P die durchgeleitete Leistung, ΔT die Temperaturdifferenz, l die Länge zwischen den beiden angelegten Temperaturen und A die Fläche des Stoffes.

Die Größe des Wärmewiderstands ist durch $R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A}$ gegeben. Hiermit kann über Formel 3.3 zu $P = \frac{\Delta T}{R_{th}}$ vereinfacht werden.

Die TFM ist definiert als $\text{TFM} = \frac{\Delta T}{\rho_p}$ mit der Leistungsdichte ρ_p , sodass P gegeben ist als $P = \rho_p \cdot A$. Mit den vorangegangenen Formeln kann diese dann zu $\text{TFM} = R_{th} \cdot A = \frac{l}{\lambda}$ umgestellt werden, wobei die Einheit $[\text{TFM}] = \frac{\text{K} \cdot \text{cm}^2}{\text{W}}$ ist.

Aus der Beziehung $\text{TFM} = \frac{l}{\lambda}$ lässt sich ableiten, dass eine gute Wärmeübertragung eine niedrige TFM erzielt. Es lässt sich jedoch auch herleiten, dass die TFM von der Länge des Materials abhängt. Aus diesem Grund wird in dieser Bachelorarbeit bei der Vermessung der Wärmeübertragung vom Device under Test (DUT) häufig die TFM verwendet, während bei der Wärmeübertragung der Aluminiumstäbe die Wärmeleitfähigkeit verwendet wird.

3.4.2 Berechnung der TFM im Setup

Um die TFM des DUTs zu bestimmen, werden vereinfacht die unterschiedlichen Materialien zwischen den Temperatursensoren als in Reihe geschaltete thermische Widerstände betrachtet. Dies ist in Abb. 3.7 dargestellt.

R_1 und R_5 ergeben somit die TFM der Aluminiumblöcke. In der Mitte ist nun zusätzlich das DUT vorhanden, wodurch sich der gemessene thermische Widerstand auf die drei Abschnitte aufteilt. Hierbei sind R_2 und R_4 wieder der thermische Widerstand des Aluminiums und somit bekannt, während R_3 der thermische Widerstand des DUTs ist.

Da der thermische Widerstand des Aluminiums durch die Messungen von R_1 und R_5 bekannt ist, kann man R_3 über die Formel 3.4 bestimmen.

$$R_3 = \frac{(T_1 - T_2) \cdot A}{P} - \frac{(T_0 - T_1) \cdot A}{P} \cdot 2 \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (3.4)$$

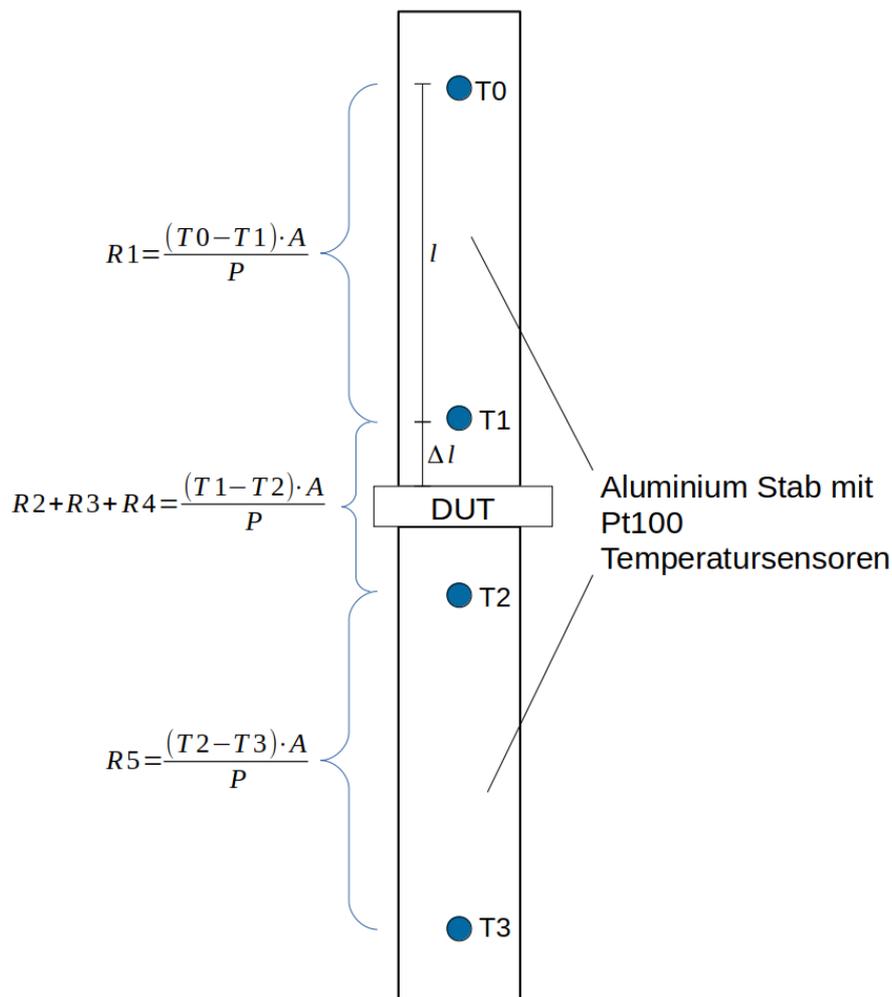


Abbildung 3.7: Schematische Zeichnung zur Berechnung des thermischen Widerstands

Bei der angegebenen Formel 3.4 wurde zur Berechnung des thermischen Widerstands des Aluminiums die Rechnung für $R1$ doppelt verwendet, da bei dieser weniger Effekte auf die Leistung und somit die errechnete TFM einwirken, als bei der Berechnung von $R5$. Diese Einflüsse werden genauer im nächsten Abschnitt erläutert. Zusätzlich muss ein Faktor $\frac{\Delta l}{l}$ an den thermischen Widerstand des Aluminiums gerechnet werden, da der thermische Widerstand mit der Dicke des Materials skaliert.

3.4.3 Effekte die Einfluss auf die TFM nehmen

In der Berechnung der TFM wird angenommen, dass die gesamte Leistung bekannt ist. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie in Abschnitt 3.4.2 angenommen wird. Es treten einige Effekte auf, die Einfluss auf den Wert der TFM haben können, wobei vor allem Effekte interessant sind, die den Wert der zugeführten Leistung verändern. Dabei spielen Effekte wie der Transport von Leistung über die Luft, deren Konvektion oder die Schwarzkörperstrahlung eine bedeutende Rolle.

Der Vakuumbehälter sorgt dafür, dass die beiden durch die Luft entstehenden Effekte minimiert werden, jedoch nicht vollständig verschwinden. Da die Leistungsübertragung durch die Luft erst dann zu vernachlässigen ist, wenn ein deutlich höheres Vakuum zur Verfügung steht, als in diesem Fall, wo es bei circa 20mbar liegt. Im Bereich der Schwarzkörperstrahlung ist der Effekt auf den Leistungsaustausch nicht zu verhindern, lässt sich jedoch abschätzen, wie in den späteren Kapiteln 4.6 und 5.3.1 gezeigt wird.

Die Einflüsse die diese Effekte haben, führen dazu, dass das gemessene ΔT nicht mehr zur vom Heizkörper eingespeisten Leistung passt. Da die Wärmeleitfähigkeit mit $\lambda \propto \frac{P}{\Delta T}$ von der Leistung und der Temperaturdifferenz abhängt, wird z.B. bei einem Leistungsverlust im Kalorimeter die Wärmeleitfähigkeit überschätzt. Da die TFM mit $TFM = \frac{l}{\lambda}$ berechnet wird, wird die TFM bei einem Leistungsverlust unterschätzt. Der umgekehrte Effekt entsteht bei einer Leistungsaufnahme. Hierbei wird die Wärmeleitfähigkeit unterschätzt und die TFM überschätzt.

Hieraus lässt sich schließen, dass mit dem Setup keine absoluten Werte der Wärmeleitfähigkeit oder TFM bestimmt werden können, solange die zusätzlichen Effekte nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Die mit dem Verfahren in Abschnitt 3.4.2 berechnete TFM, ist jedoch trotzdem ein sinnvolles Maß für die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit der Bare Cell. Der Grund hierfür ist, dass bei ausreichend sorgfältiger Durchführung der Messung der TFM von verschiedenen DUTs, die nicht berücksichtigten Effekte das Messergebnis jeweils in gleicher Weise beeinflussen. Wenn nun die TFM zweier DUTs unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt wird, kann die relative Performance der DUTs verglichen werden. Für die Serienproduktion der Bare Cell wird zum Vergleich eine den Spezifikationen entsprechende Referenzzelle verwendet.

Inbetriebnahme

Zur Inbetriebnahme des Setups zur Qualitätskontrolle der Bare Cell müssen einige Kalibrationsmessungen und Fehlerabschätzungen vorgenommen werden. Zur Auswertung dieser Daten werden häufig Graphen und Fit-Kurven erstellt. Diese werden mit der Funktion `curve_fit` des Python-Skripts `scipy` ausgewertet, welches automatisch die Fehler der Parameter der Fit-Kurven berechnet.

Des Weiteren ist die Erstellung einer grafischen Auslesesoftware notwendig.

4.1 ADC-Kalibration

Die Spannung der unterschiedlichen Messinstrumente wird mit ADCs ausgelesen.

Bei einem ADC wird ein kontinuierliches analoges Signal mittels Abtastung und Quantisierung in ein Digitales überführt. Dafür hat der ADC ein Register, in welchem dem analogen Signal eine Bitfolge zugewiesen wird. Dies gelingt dadurch, dass der Eingangsspannungsbereich in N kleine Bereiche geteilt wird, welchem dann jeweils im Register eine Bitfolge zugewiesen wird. Hierdurch wird ein kontinuierliches Signal quantisiert, was den Effekt hat, dass nur so genau gemessen werden kann, wie die Aufteilung des zu messenden Bereiches gewählt wird.

Hierbei gibt es nun zwei Möglichkeiten die Spannung zu messen. Die erste Möglichkeit ist die Spannung an einem Messpin des ADC gegen eine Referenzspannung vom ADC zu messen, während die andere eine differentielle Messung von zwei Messpins gegeneinander ist. Bei der ersten Methode kann das Problem entstehen, dass der ADC ein Offset von Null hat und somit eine Kalibration des Nullpunkts vorgenommen werden muss. Diese liegt an der Referenzspannung mit welcher der ADC vergleicht, welche durch die 3,3V-Schiene des *Raspberry pi* geliefert wird. Bei der Vergleichsmessung kann es somit zu Schwankungen sowie einem Offset kommen, da der *Raspberry pi* keine gute Spannungsquelle ist und keine Rauschunterdrückung besitzt.

Bei der differentiellen Messung zwischen zwei Messpins des ADCs kann dieser konstante Offset nicht entstehen. Hier wird zwar auch mit der vom *Raspberry pi* gelieferten Erde abgeglichen und über $V_{\text{out}} = V_{\text{gemessen}} - V_{\text{Referenz}}$ der Spannung zu ermittelt, jedoch werden die vom jeweiligen Messpin erhaltenen Spannungen dann noch einmal miteinander abgeglichen, wodurch sich die Formel zu $V_{\text{out}} = (V_{\text{gemessen}}^1 - V_{\text{Referenz}}) - (V_{\text{gemessen}}^2 - V_{\text{Referenz}})$ umstellt und danach zu $V_{\text{out}} = V_{\text{gemessen}}^1 - V_{\text{gemessen}}^2$ vereinfacht, wodurch das Messergebnis unabhängig von V_{Referenz} ist. Das Spannungsrauschen der 3,3V-Schiene des *Raspberry pi*s bleibt damit jedoch in der Messung erhalten, da diese Schwankungen direkt

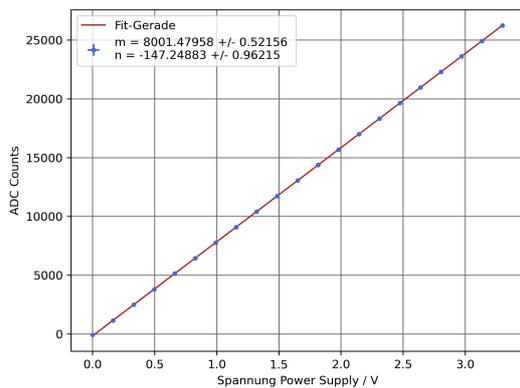


Abbildung 4.1: Kalibrationsmessung eines ADCs bei einer Spannungsmessung über einen Messspin mit einem Spannungsbereich von 4,096V

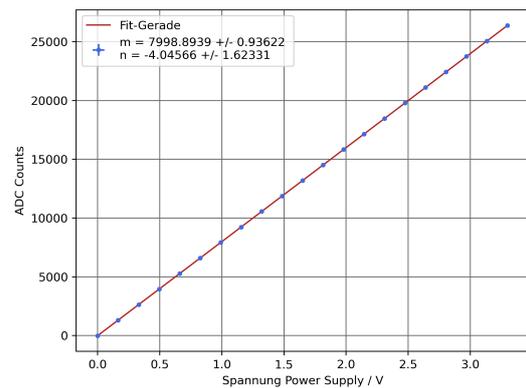


Abbildung 4.2: Kalibrationsmessung eines ADCs bei einer differentiellen Spannungsmessung über zwei Messpins mit einem Spannungsbereich von 4,096V

auf die Referenzspannung, gegen welche verglichen wird, einwirken.

Eine Kalibration der ADCs kann nun vorgenommen werden, indem über eine Spannungsquelle bestimmte Spannungen auf die Messpins gelegt werden und dann die gemessenen Spannungen mit den vom ADC ausgegebenen ADC Counts vergleicht. Dies ist in Abb. 4.1 und 4.2 zu sehen. Die Fehlerbalken der Punkte fallen sehr gering aus, da vom Hersteller für die Spannungsabgabe des Netzgeräts ein Fehler von $<0.05\% + 7\text{mV}$ angegeben ist [11] und die Ausgabe der ADC Counts des ADCs über zehn Messwerte gemittelt wird. In beiden Fällen ist der Fehler auf die Messung gering, weswegen die Fehler nicht im Graphen zu sehen sind.

Aus den erhaltenen Messungen ist zu erkennen, dass der Offset für die Messung über einen Messpin bei $-147,25 \pm 0,96$ ADC Counts liegt. Dieser Offset ist groß, wenn man in Betracht zieht, dass bei der Messung der Lastzelle nur einige mV ausgegeben werden und ein ADC Count einigen Hundert μV entspricht. Zudem wird beobachtet, dass der Offset bei jedem Start des *Raspberry pi* unterschiedlich ist und somit jedes mal neu bestimmt werden muss.

Bei der differentiellen Messung über zwei Messpins ist zu sehen, dass der Offset nur $-4 \pm 1,6$ ADC Counts beträgt. Dieser Offset ist deutlich geringer als bei der anderen Messmethode, weshalb nur die differentielle Messung für die Bestimmung der zu messenden Spannung in Frage kommt.

4.2 Lastzelle

Die im Setup verbaute Lastzelle selbst wird ohne Kalibrationsgerade geliefert und muss somit vor Ort kalibriert werden, um den Druck, welcher auf das Soft-PGS wirkt, ausrechnen zu können. Dies wird mit dem in Abb. 4.3 gezeigten Aufbau durchgeführt.

Der Aufbau besteht aus einer Schaukel, welche auf der Lastzelle platziert wird und das Gewicht punktuell auflegt. An dieser ist ein Federkraftmesser befestigt, mit welchem, das im Käfig liegende Gewicht, vermessen wird.

Für den Federkraftmesser wird ein Fehler von 0,3kg angenommen, da dies die abgeschätzte Ablesegenauigkeit auf der Skala ist. Zusätzlich hierzu haben die Schaukel und der Federkraftmesser selbst ein

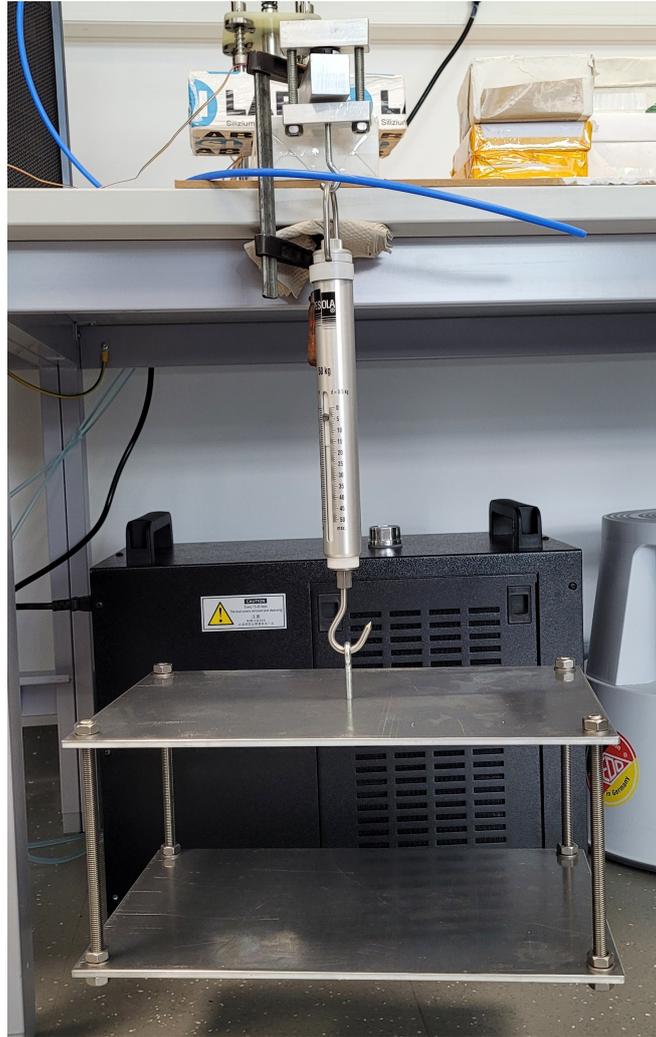


Abbildung 4.3: Kalibrationsaufbau Lastzelle

Gewicht von $(0,62 \pm 0,01)\text{kg}$, welches auf das gemessene Gewicht addiert werden muss.

Diese Kalibration wird dann für zwei Lastzellen durchgeführt, um einen Vergleich zwischen diesen zu erhalten. In Abb. 4.4 ist die Kalibration der im Setup verbauten Lastzelle zu sehen und in Abb. 4.5 ist die Kalibration der Vergleichs-Lastzelle zu sehen.

Aus den Fit-Parametern für die jeweils angepassten Geraden ist zu sehen, dass die Lastzellen in Steigung m und y -Achsenabschnitt n miteinander, unter Einbeziehung der Fehler, übereinstimmen.

Dies bestätigt die Funktionsweise der Lastzellen und zeigt die Funktionalität des Aufbaus. Zudem ist es durch die Bestimmung der Fit-Geraden für die Lastzelle nun möglich, das auf ihr lastende Gewicht über die ausgegebene Spannung zu bestimmen.

In Kapitel 3.2.1 wird beschrieben, dass eine Änderung der Versorgungsspannung der Lastzelle keine Änderung in der Steigungsabhängigkeit bei Gewichtsänderung hervorruft. Um dies zu überprüfen, wird die durchgeführte Messung nun einmal mit 4V und einmal 5V an der verbauten Lastzelle durchgeführt. Die hieraus erhaltenen Graphen sind in Abb. 4.6 und 4.7 zu sehen. Dabei ist die y -Achse in $\frac{\text{mV}}{\text{V}}$ -Schritten

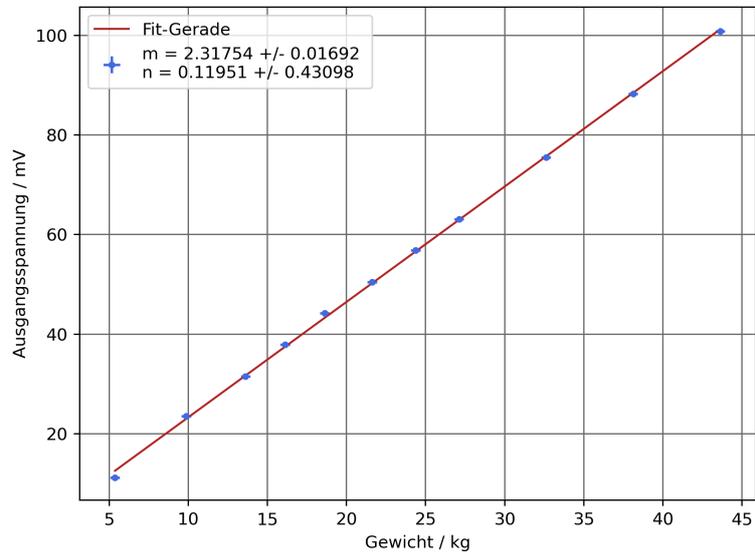


Abbildung 4.4: Kalibrationsgerade der Verbauten Lastzelle bei 5V

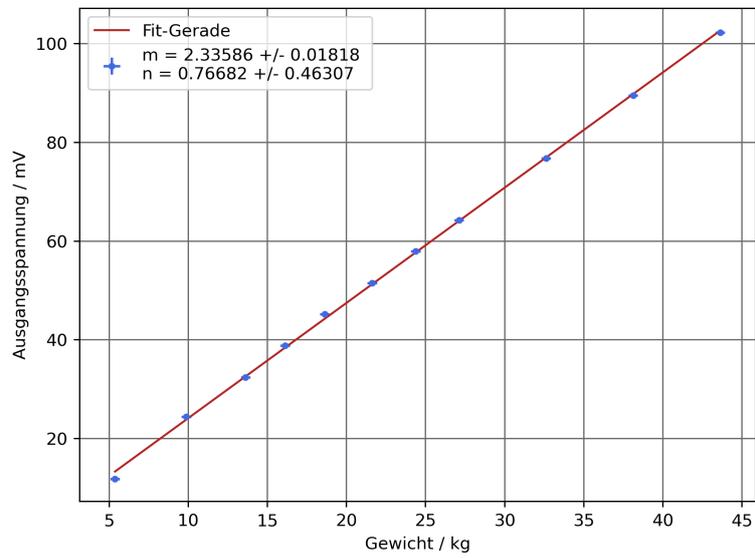


Abbildung 4.5: Kalibrationsgerade der Vergleichs-Lastzelle bei 5V

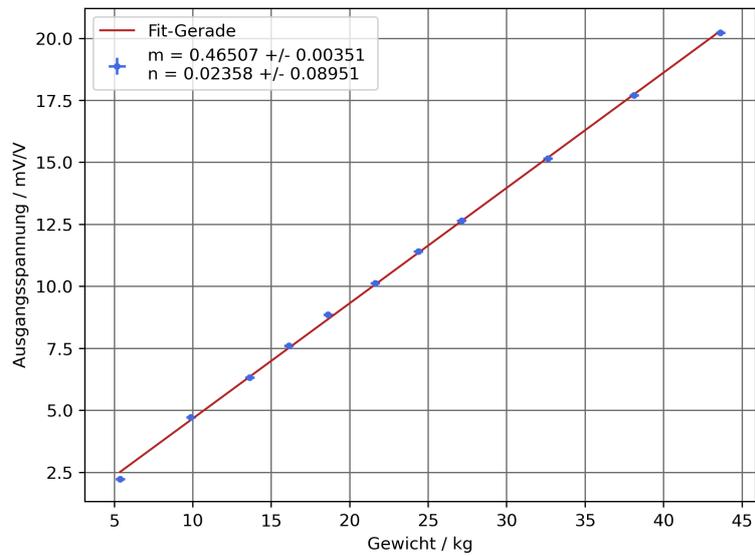


Abbildung 4.6: Kalibrationsgerade der verbauten Lastzelle bei 4V

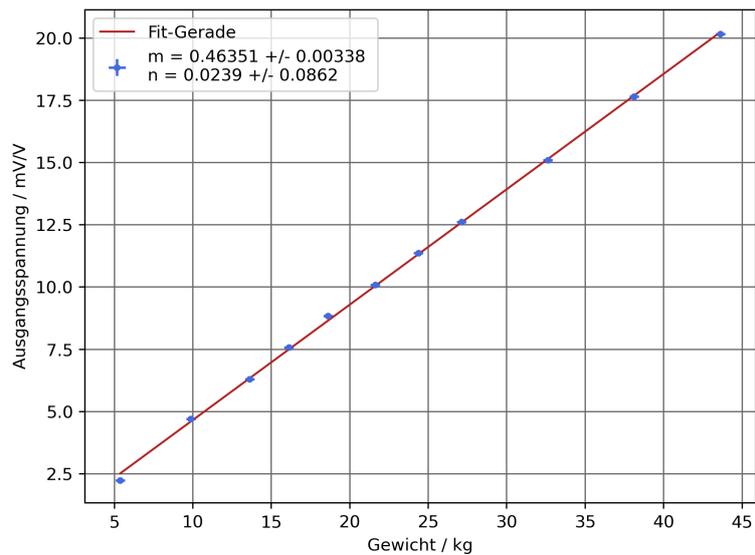


Abbildung 4.7: Kalibrationsgerade der verbauten Lastzelle bei 5V

angegeben, wobei es sich um die ausgegebenen mV geteilt durch die Eingangsspannung der Lastzelle handelt.

Beim Vergleich der Fit-Parameter ist zu sehen, dass sich, wie zu erwarten, keine Veränderung in der Ausgangsspannung in Abhängigkeit zur Eingangsspannung zeigt.

4.3 Widerstand-Kalibration in der Ausleseelektronik

Wie schon in 4.1 erwähnt, werden zur Auslese der Spannungen ADCs im differentiellen Modus verwendet. An diesen werden dann die Ausgangsspannung der Lastzelle, die Versorgungsspannung der Spannungsteiler und der jeweilige Abfall der Spannung über die Pt100 zur Ermittlung der Widerstände dieser gemessen. Um diese Daten alle differentiell zu vermessen, werden drei ADCs benötigt mit jeweils vier Messpins.

Da die Messung der Temperatur so genau wie möglich sein soll, ist es notwendig, die im Spannungsteiler verwendeten Widerstände genau zu kennen. Diese sind mit $(100 \pm 1\%)\Omega$ angegeben.

Um nun den exakten Widerstand zu kennen, wurde eine U - I -Kurve der vier verwendeten Widerstände gemessen und aus dieser dann der Widerstand ermittelt. Aus den erhaltenen Geraden-Fits mit $y = m \cdot x + n$ kann aus der Formel $U = R \cdot I$ direkt der Widerstand an der Steigung abgelesen werden.

Wie in Abb. 4.8 zu sehen ist, sind alle Widerstände im Bereich von $(100 \pm 1)\% \Omega$ und weisen nur kleine Abweichungen voneinander auf. Der erste Widerstand hat $(99,466 \pm 0,00324)\Omega$, der zweite $(99,693 \pm 0,00324)\Omega$, der dritte $(99,849 \pm 0,00324)\Omega$ und der vierte $(99,64 \pm 0,00324)\Omega$. Die hier festgestellten Unterschiede sind zwar gering, jedoch können sie bei der Berechnung der Temperatur einen großen Unterschied machen.

Beispielhaft kann hier nur unter Berücksichtigung der Fehler des 100Ω Widerstands über die Formeln 3.1 und 3.2 ein Fehler für die Temperatur berechnet werden. Zur Berechnung dieser werden die fehlerfreien Werte $U_{Pt100} = 1,7V$ und $U_{Gesamt} = 3,3V$ angenommen. Für den 1% Fehler, der für die verwendeten 100Ω Widerstände angegeben ist, erhält man durch die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung ein Wert von $(16,2 \pm 2,8)^\circ C$. Für die aus der Kalibration erhaltenen Werte der Widerstände, wobei hier der Widerstand mit $(99,64 \pm 0,00324)\Omega$ genommen wird, erhält man einen Wert von $(14,567 \pm 0,008)^\circ C$. Die Genauigkeit wird somit durch die Kalibration der Widerstände deutlich verbessert. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass für die Fehlerberechnung der Widerstände die idealen Messtoleranzen des Netzgeräts verwendet werden, wodurch ein sehr geringer Wert des Fehlers entsteht.

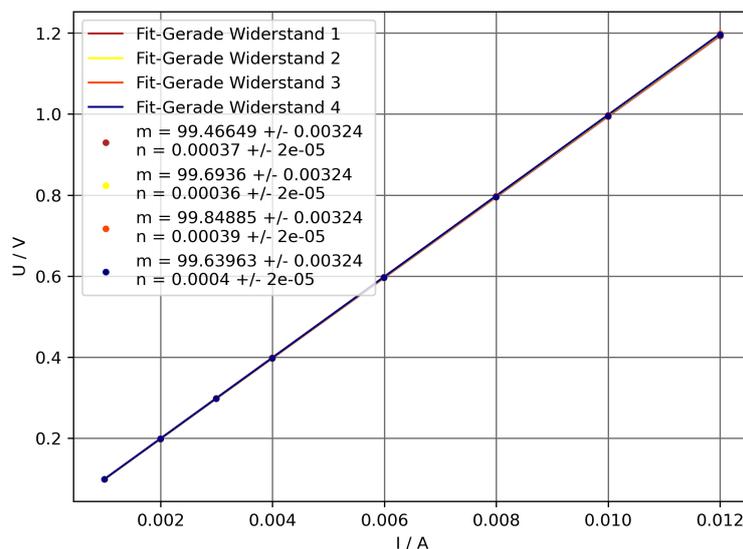


Abbildung 4.8: U-I-Kurve der Widerstände

4.4 GUI

Zur leichteren Bedienung des Setups ist während der Bachelorarbeit ein GUI (graphical user interface) entstanden, mit welchem man dieses bedienen und auslesen kann. Das fertige GUI ist in Abb. 4.9 zu sehen.

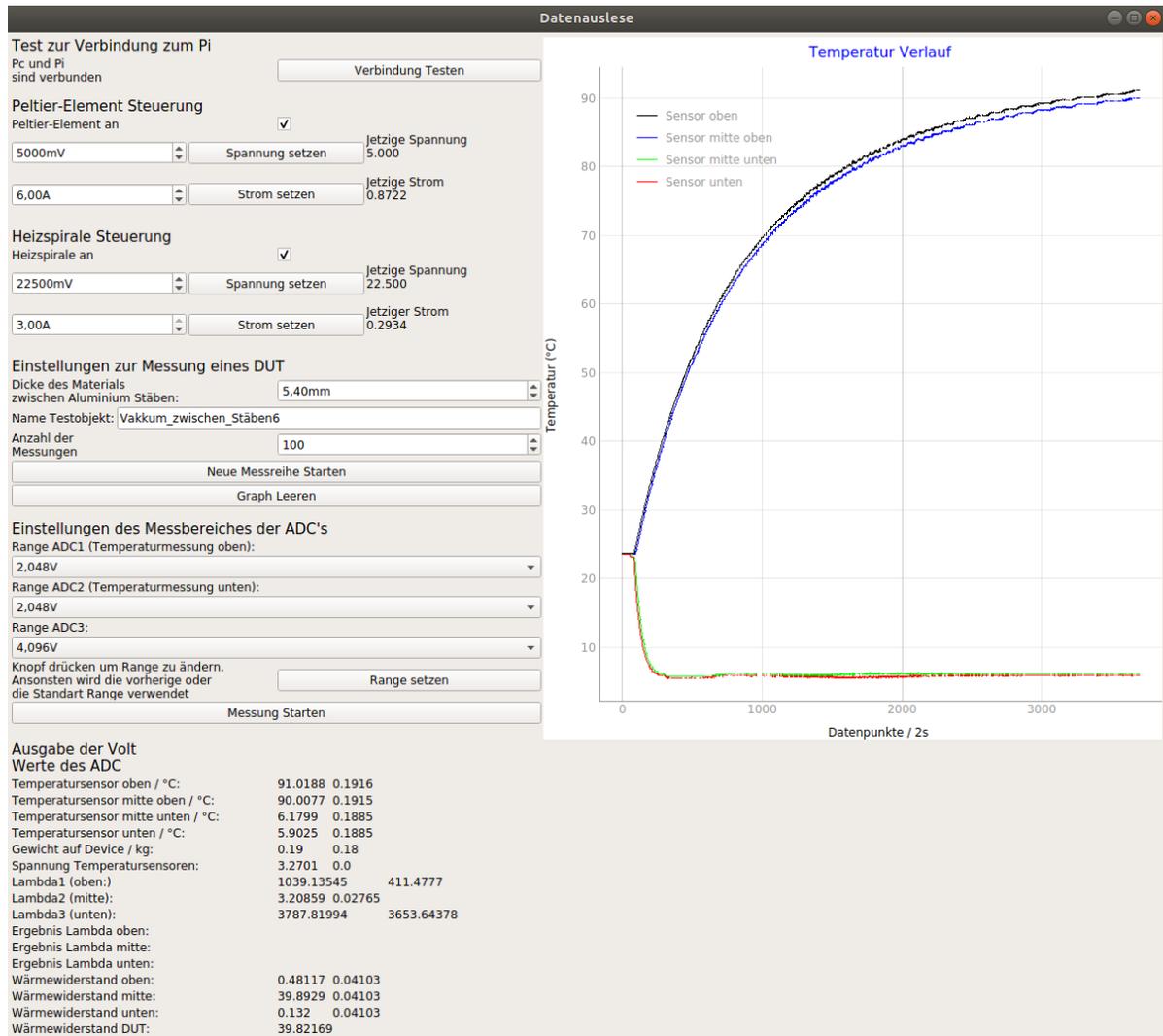


Abbildung 4.9: Das GUI im Messbetrieb

Über das programmierbare Netzgerät ist es möglich, mit dem GUI die Spannung sowie den Strom des Peltier-Elements und des Heizkörpers einzustellen. Zudem werden die vom Netzgerät ausgegebenen Werte im GUI angezeigt. Dies hat den Vorteil, dass man das Netzgerät nicht dauerhaft im Blick haben muss und leichter neue Werte einstellen kann.

Zudem können über das GUI Einstellungen an der Auslese der ADCs vorgenommen werden, wie die Änderung des Spannungsbereichs sowie die Auflösung, mit welcher die ADCs messen.

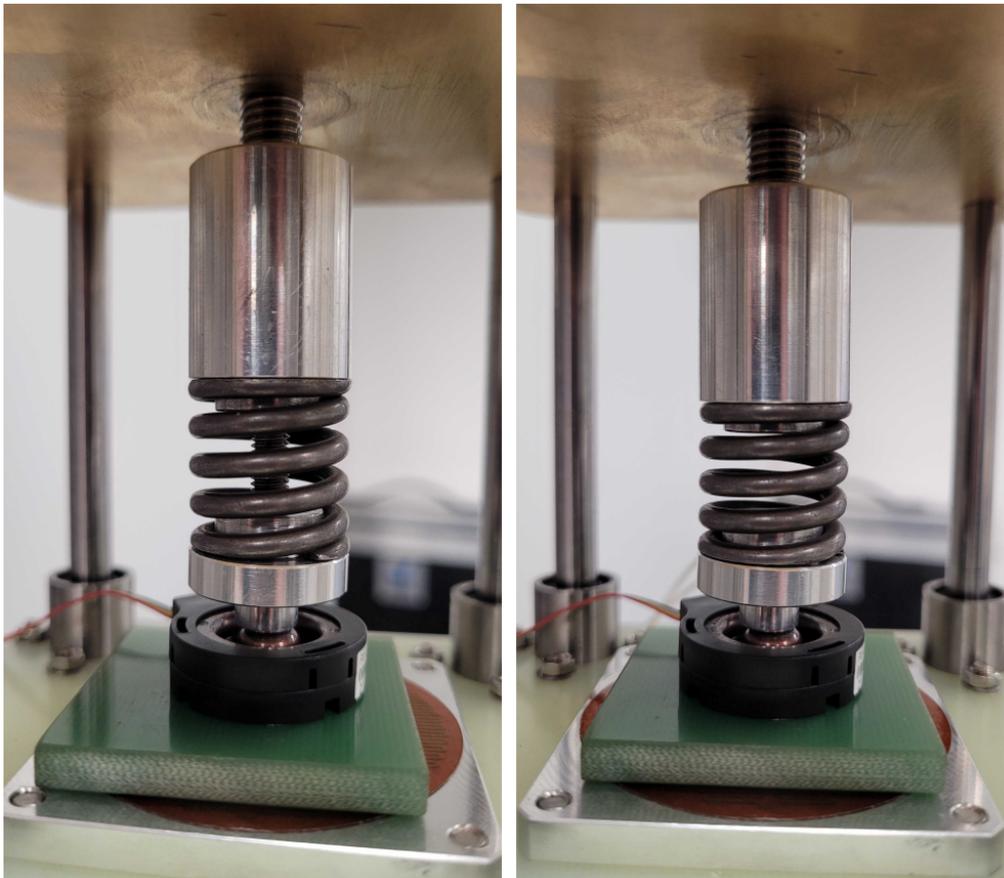
Allgemein können auch Änderungen in bestimmten Parametern der Auswertung der erhaltenen Daten

eingestellt werden. Hierbei kann die Dicke des verwendeten DUTs, die Anzahl der Messungen über die gemittelt wird, sowie den Namen der Dokumente geändert werden.

Um einen Überblick über die Entwicklung der Temperaturen zu bekommen, ist ein sich alle 2 Sekunden aktualisierender Graph einprogrammiert. Im gleichen Zeitabstand werden die im unteren Teil angezeigten Werte aktualisiert, wobei hier nochmals die Temperatur mit Fehler zu sehen ist. Ebenfalls findet man dort das auf dem DUT lagernde Gewicht. Es wird außerdem die Wärmeleitfähigkeit und die TFM zu diesem Zeitpunkt angegeben. Dies macht es vor allem einfacher die Wärmeleitfähigkeit im Temperatur-Gleichgewicht abzuschätzen, bevor eine Messung gestartet wird.

4.5 Temperaturabhängigkeit der Kraft auf das DUT

Um den auf das Soft-PGS einwirkenden Druck zu verändern, wird eine Stellschraube im Gerüst verwendet, welche die Kraft mit einer Feder auf die Aluminiumstäbe überträgt (s. Kapitel 3.1). Zu Beginn wurde diese Feder und ihre untere Halterung über einen Metall Pin in Position gehalten, welcher in Abb. 4.10 zu sehen ist.



Mit Stabilitätspin

Ohne Stabilitätspin

Abbildung 4.10: Feder mit und ohne Metall Pin

Dabei ergab sich jedoch das Problem, dass ab einer bestimmten Anzahl an Drehungen nicht mehr die Feder, sondern der Pin die Kraft übertragen hat. Dies lag daran, dass der Pin in der unteren Halterung der Feder verschraubt war und das Loch, in der er in der oberen Halterung der Feder lose lag, nur eine bestimmte Tiefe hat. Der Pin stieß deshalb nach einigen Umdrehungen an die Decke des Aluminiums. Das führt dazu, dass die angewendete Kraft durch den Pin übertragen wird. In Abb. 4.11 ist dieser Effekt ab circa 6mm Schraubtiefe zu sehen. Dabei ist der Nullpunkt von Δl so gewählt, dass durch die Schraube eine Kraft von $(18,8 \pm 0,7)\text{N}$ auf die Aluminiumstäbe wirkt.

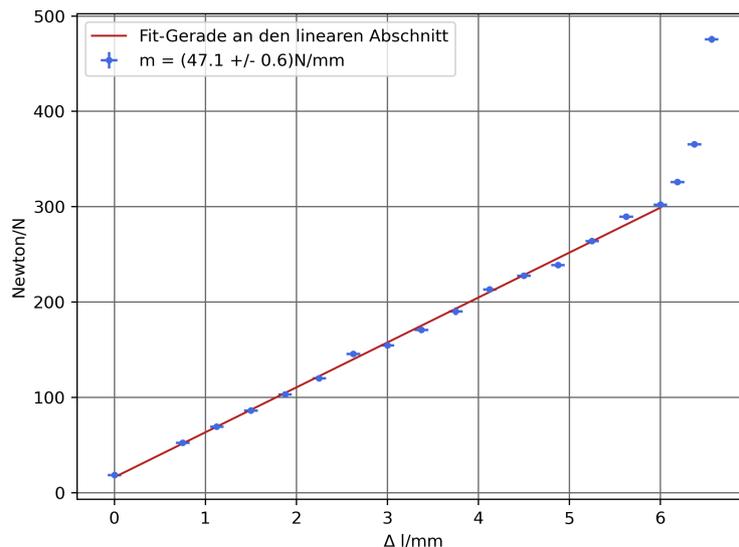


Abbildung 4.11: Änderung des Drucks auf das DUT durch die Schraube

Aus der gleichen Messung kann die Federkonstante der benutzten Feder über das Hook'sche Gesetz $F = k \cdot \Delta l$ bestimmt werden. Unter Verwendung der Daten für $\Delta l < 6\text{mm}$, erhält man eine Federkonstante von $(47,1 \pm 0,6) \frac{\text{N}}{\text{mm}}$.

Wenn nun jedoch nicht mehr die Feder die Kraft überträgt, sondern der Metall Pin, kommt es zu einer starken Temperaturabhängigkeit der einwirkenden Kraft. Da im Normalfall die Feder die Ausdehnung der Aluminiumstäbe abfängt, ist die Temperaturabhängigkeit gering. Wenn nun nur Metallstäbe aufeinander liegen, sorgt nicht mehr die Federkonstante für die Druckänderung, sondern das Elastizitätsmodul, was grob einer extremen Erhöhung der Federkonstante entspricht. Dies ist ebenfalls in Abb. 4.11 zu sehen, wo ab 6mm Schraubtiefe aus einem linearen Anstieg eine quadratische Steigung wird.

Da bei einer extrem hohen Federkonstante selbst kleinste Auslenkungen einen großen Einfluss auf den ausgeübten Druck haben, ist die Längenänderung des Aluminiums durch die Absenkung der Temperatur genug, um einen gut messbaren Unterschied im Druck auf das DUT festzustellen. Dies ist in Abb. 4.12 zu sehen.

Feststellbar ist, dass eine Änderung der Temperatur im Mittel von 8°C einen Unterschied in der ausgeübten Kraft von bis zu ungefähr 13kg haben kann.

Da es sich um eine Ausdehnung von Aluminium handelt, wäre eine lineare Änderung des Gewichts mit dem Ausdehnungskoeffizienten zu erwarten. In diesem Fall ist jedoch ein hohes Gewicht durch die Schraube angelegt und dann die Temperatur des Aluminiums gesenkt worden. Hierdurch wird das lineare

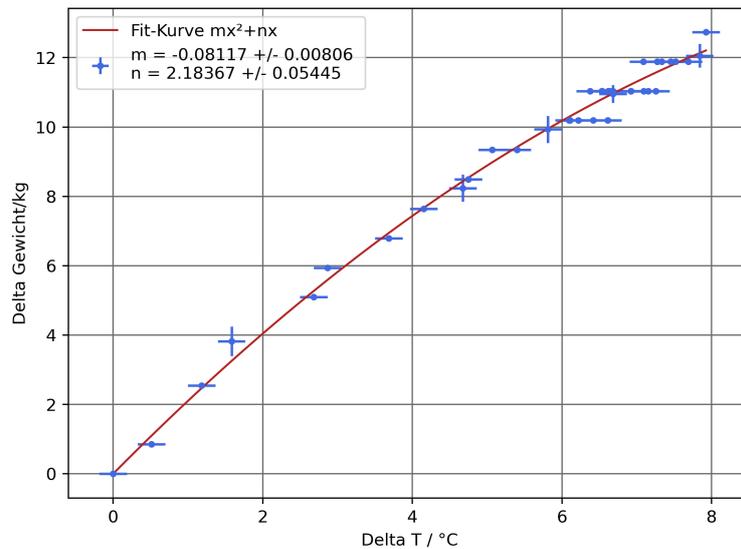


Abbildung 4.12: Druckabhängigkeit der Temperatur im Bereich der Druckausübung durch den Metall Pin

Zusammenziehen des Aluminiums zusätzlich durch die eingebaute Feder gedämpft und erhält einen quadratischen Anteil.

Da die Schraube nach Aufsetzen des Vakuumbehälters nicht mehr verstellbar ist und erst dann das Setup auf -10°C gekühlt wird, ist diese Veränderung zu groß und der Metall Pin muss entfernt werden. Das Erschwert das Austauschen von DUTs, macht dies aber nicht unmöglich.

4.6 Schwarzkörperstrahlung

In Kapitel 3.4.3 wird beschrieben, dass es einige Effekte gibt, die Einfluss auf den Wert der TFM haben. Einer der Effekte ist die Schwarzkörperstrahlung, welche für einen Leistungsaustausch mit der Umgebung sorgt. Diese wird in diesem Kapitel genauer untersucht.

Um die Genauigkeit des Setups zu überprüfen und mit theoretischen Erwartungen zu vergleichen, wird dem oberen Aluminiumstab unterschiedliche Leistung zugeführt und dessen Temperatur vermessen, ohne dass dieser den unteren berührt. Wenn der Aufbau nun im Vakuumbehälter betrieben wird, wird in guter Näherung ein Schwarzer Körper erreicht und das Stefan-Boltzmann-Gesetz $P = \sigma AT^4$ kann angewendet werden, um aus der eingespeisten Leistung die zu erwartende Temperatur zu errechnen.

Die hierbei angenommene Fläche bezieht sich nur auf den oberen Aluminiumstab und die mit ihm verbundene Aluminiumplatte, auf der der Heizkörper angebracht ist. Somit werden weitere Berührungspunkte, welche vor allem mit der Plastikebene auf dem der obere Aluminiumstab aufliegt existieren, vernachlässigt. Ebenfalls wird der Wärmeaustausch durch die im Vakuumbehälter verbleibende Luft vernachlässigt.

Wenn die vom Vakuumbehälter geschaffene Umgebungstemperatur miteinbezogen wird, dann lässt sich eine Leistungsdifferenz aus der vom Vakuumbehälter eingestrahlt und vom Kalorimeter wieder abgestrahlt Leistung berechnen, unter der Annahme, dass das Kalorimeter die gesamte Leistung der

Umgebung aufnimmt. Hieraus folgt

$$P_{\text{Kalorimeter}} - P_{\text{Umgebung}} = \sigma A_{\text{Kalorimeter}} \cdot T_{\text{Kalorimeter}}^4 - \sigma \alpha A_{\text{Umgebung}} \cdot T_{\text{Umgebung}}^4$$

$$\Delta P = \sigma (A_{\text{Kalorimeter}} \cdot T_{\text{Kalorimeter}}^4 - \alpha A_{\text{Umgebung}} \cdot T_{\text{Umgebung}}^4)$$

als Gleichung für die ein- oder abgestrahlte Leistung des Kalorimeters. Da die Geometrie des Vakuumbehälters sehr komplex ist und es viele Einstrahlungswinkel und einwirkende Faktoren auf die strahlende Fläche gibt, wird ein Faktor α hinzugefügt, mit welchem die Effektiv der auf das Kalorimeter einstrahlende Fläche bestimmt werden kann, welche dann als $A_{\text{eff}} = \alpha \cdot A_{\text{Umgebung}}$ gegeben ist.

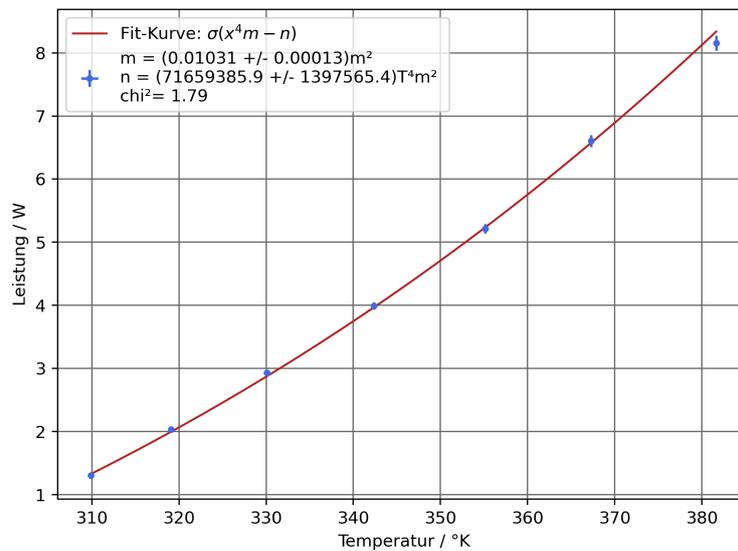


Abbildung 4.13: Die in das obere Kalorimeter eingespeiste Leistung gegen die mittlere Temperatur des oberen Kalorimeters

In Abb. 4.13 ist das Ergebnis der Messung zu sehen und es lässt sich klar eine Abhängigkeit der Leistung von T^4 erkennen, was somit grob die Annahme bestätigt, dass ein Großteil der mit der Umgebung ausgetauschten Wärme über Strahlung geschieht.

Der Fit-Parameter m entspricht in der Formel der abstrahlenden Fläche des Kalorimeters. Die hierbei zu erwartende Fläche wäre $(0,01151 \pm 0,00014)\text{m}^2$ (mit Werten aus Kapitel 3.1). Die aus dem Fit erhaltene Fläche von $(0,010309 \pm 0,000128)\text{m}^2$ liegt unter diesem Wert, jedoch sehr gut in der Größenordnung des erwarteten Werts.

Aus dem Fit-Parameter n lässt sich A_{eff} bestimmen, wenn man die Umgebungstemperatur $T_{\text{Umgebung}} = (24 \pm 1^\circ\text{C})$ als die Temperatur des Vakuumbehälters annimmt. Mit $A_{\text{eff}} = \frac{n}{T_{\text{Umgebung}}^4}$ kann dann die effektiv auf das Kalorimeter einstrahlende Fläche auf $(0,00932 \pm 0,00031)\text{m}^2$ berechnen werden. Diese Fläche ist deutlich kleiner als die des Vakuumbehälters und passt zu der Erwartung, dass viele weitere Effekte in die Schwarzkörperstrahlung einfließen so wie der Wärmeaustausch mit der Luft oder die komplexe Geometrie des Vakuumbehälters und insbesondere die Tatsache, dass nicht die gesamte vom Vakuumbehälter abgestrahlte Leistung vom oberen Aluminiumstab absorbiert wird. Die effektiv strahlende Fläche ist deswegen interessant, da mit ihr Leistungsänderungen über die

Schwarzkörperstrahlung berechnet werden können, wie es auch im später folgenden Kapitel [5.3.1](#) genutzt wird.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die aus einigen Messungen zum besseren Verständnis des Setups erhaltenen Ergebnisse sowie die Ergebnisse einiger Probemessungen mit Prototypen der Bare Cells gezeigt. Zusätzlich werden einige Messungen mit Modell Bare Cells, welche vom CERN an die Universität Bonn geschickt wurden, durchgeführt, um das Setup zu kalibrieren.

5.1 Test Messung Aluminium ohne DUT

Der erste durchgeführte Test ist eine Messung der Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums, ohne Einsetzen eines DUT's, in Abhängigkeit zum Druck, welcher auf die Aluminiumstäbe ausgeübt wird. Hierbei ergibt sich der Graph 5.1, an den eine Exponential-Funktion angefitet ist.

Das kontinuierliche Sinken der TFM entsteht aus der Druckerhöhung auf die Aluminiumstäbe, da immer mehr direkte Kontaktfläche entsteht und der Wärmeaustausch dann durch Wärmeleitung und nicht durch Wärmestrahlung oder über die Luft stattfindet. Zusätzlich existieren beim anfänglichen Aufeinandertreffen der Aluminiumflächen Unebenheiten oder leichte Schrägen der Flächen, wodurch weniger Kontaktfläche entsteht.

Den Effekt, den diese Unebenheiten auf die Wärmeleitfähigkeit haben, kann man in Graph 5.2 sehen. Bei den Wiederholungsmessungen fällt auf, dass die Anfangswerte nicht die gleichen sind. Dies liegt vermutlich an leicht unterschiedlichen Stellungen der Aluminiumstäbe, wodurch mehr oder weniger Kontaktfläche zwischen dem Aluminium entsteht. Dies führt zu einer veränderten TFM, da diese vor allem vom direkten Kontakt des Aluminiums abhängt.

Aus diesen Messungen ist auch die Wärmeleitfähigkeit des oberen Aluminiumstabes in Graph 5.3 dargestellt.

Man kann in den Datenpunkten vom 20. und 21. September erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit des oberen Kalorimeters abnimmt je größer der Druck auf die Stäbe wird. Zu erwarten wäre hierbei jedoch eine annähernd konstante Wärmeleitfähigkeit, da am Material keine Veränderung außer dem auf ihm lastenden Druck vorgenommen wurde.

Hierbei muss man jedoch beachten, dass es durch die bessere Übertragung der Wärme an dem unteren Aluminiumstab auch eine bessere Leistungsübertragung zwischen den Aluminiumstäben gibt. Eine mögliche Erklärung wäre, dass durch den erhöhten Wärmefluss die Temperaturdifferenz im oberen Aluminiumstab ebenfalls größer wird, da die Temperaturdifferenz in der Mitte sinkt, was durch die

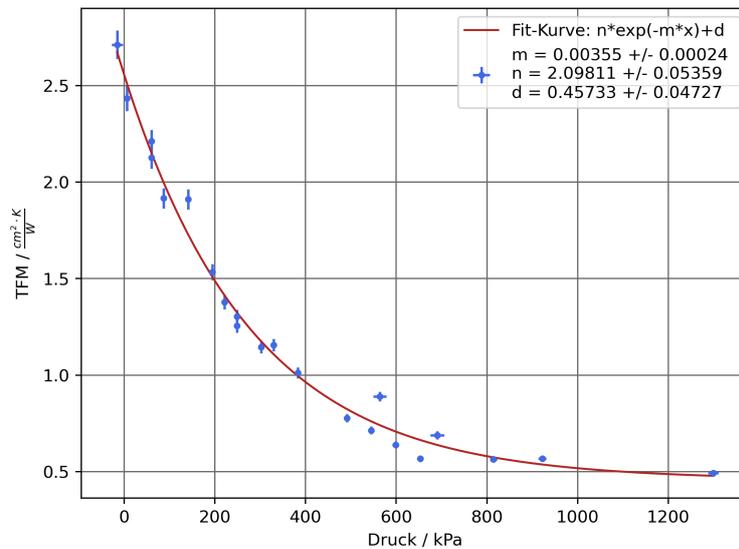


Abbildung 5.1: Messung der Wärmeleitfähigkeit gegen den ausgeübten Druck ohne DUT

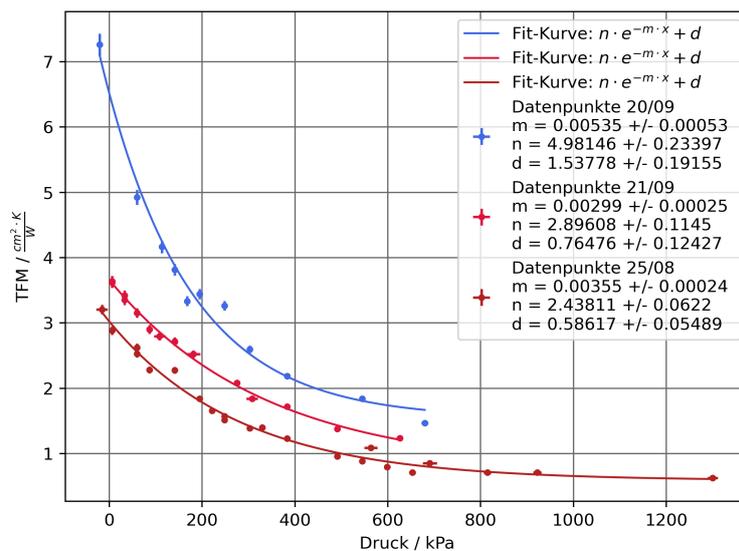


Abbildung 5.2: Wiederholungsmessung der Wärmeleitfähigkeit gegen den ausgeübten Druck ohne DUT

sinkende TFM zu erkennen ist. Dies bedeutet, dass die Wärme besser geleitet wird. Aus dem Verhältnis $\lambda \propto \frac{P}{\Delta T}$ folgt dann ein kleineres Lambda als zuvor da ΔT steigt und P konstant bleibt im Vergleich zu einer Messung mit schlechterer Wärmeübertragung zwischen den Aluminiumstäben.

Der Effekt ist jedoch nur bei den Daten vom 20. und 21. September zu beobachten. In den Daten vom 25. August ist der Effekt nicht zu sehen, da der Leistungsaustausch zum unteren Aluminiumstab vielleicht schon von Beginn der Messung an gut genug war, um etwaige Leistungsgewinne im unteren Kalorimeter zu übertragen. Zusätzlich könnten Effekte wie eine verminderte Umgebungstemperatur und damit auch

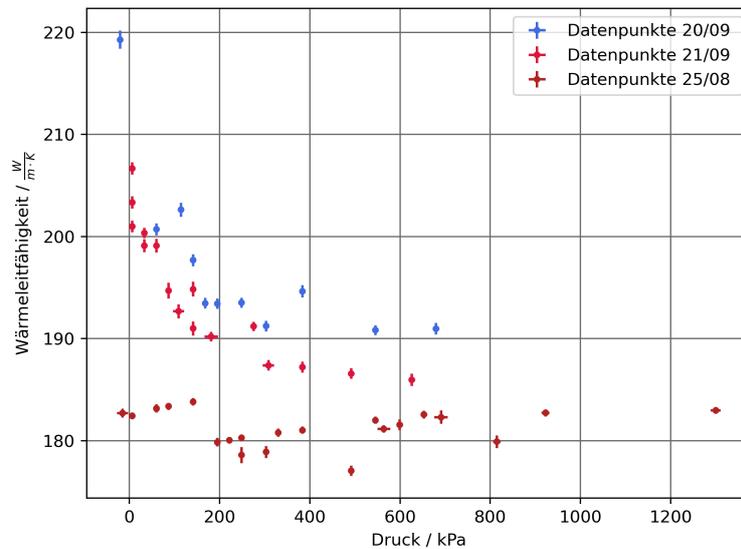


Abbildung 5.3: Wärmeleitfähigkeit des oberen Aluminiumstabes gegen den ausgeübten Druck

eine geringerer Netto-Leistungsaustausch dazu beigetragen, dass keinen Abfall der Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums im oberen Stab zu beobachten ist.

5.2 Soft-PGS

Als nächstes Testobjekt wird Soft-PGS als DUT verwendet, da die TFM des Soft-PGS unter veränderlichem Druck aus dem Datenblatt bekannt ist (s. Abb. 5.4) und somit einen guten Test für die qualitative Funktionalität des Setups darstellt.

Zur Messung wird das Soft-PGS zwischen die Aluminiumstäbe gelegt und der Druck immer weiter erhöht. Dieser wird dann wiederholt um die Reproduzierbarkeit der Daten zu bestätigen, woraus dann der Graphen 5.5 entsteht.

An den beiden Messungen von zwei unterschiedlichen Soft-PGS-Plättchen ist deutlich zu sehen, dass die Messung reproduzierbar ist und zu vergleichbaren Ergebnissen kommt. Um dies zu verdeutlichen wird eine Fit-Kurve durch beide Messungen gelegt.

Wenn nun die zu erwartende Kurve mit den aus den Messungen erhaltenen Werten verglichen wird, dann ist zu erkennen, dass die gemessene Kurve qualitativ gute Übereinstimmungen mit der erwartenden Kurve liefert. Hierbei ist zu beachten, dass das vermessene Soft-PGS eine Dicke von 230µm besitzt und somit am besten mit dem 250µm dicken Soft-PGS vergleichbar ist.

Im Gegensatz zur vom Hersteller bereitgestellten Kurve liegt die TFM der Messung bei hohem Druck deutlich über $0,3 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$, während der Herstellerwert bei gleichem Druck ungefähr $0,2 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$ hat. Dies liegt daran, dass es sich als schwierig erweist mit dem Setup absolute Werte zu messen, wie in Kapitel 3.4.3 genauer erläutert. In diesem Fall sorgt eine Leistungsaufnahme des Kalorimeters für eine überschätzte TFM. Die Leistungsaufnahme kann aus der Umgebungstemperatur kommen, da das Kalorimeter eine tiefere Temperatur als diese hat und somit durch Strahlung und Temperatúraustausch mit der Luft Leistung hinzugewinnen kann.

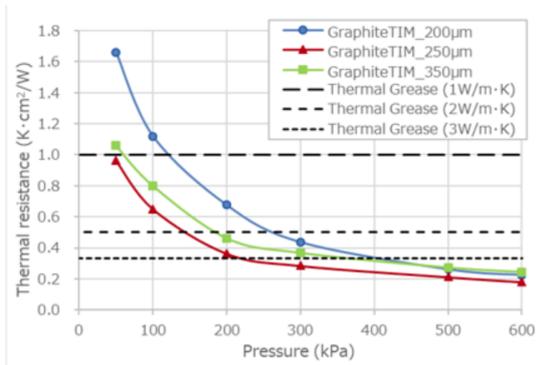


Abbildung 5.4: Veränderung der TFM des Soft-PGS unter Druck [5]

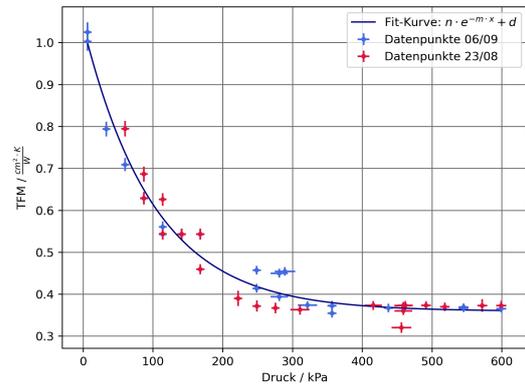


Abbildung 5.5: Veränderung der TFM des Soft-PGS unter Druck vermessen mit dem Setup

Tabelle 5.1: Literaturwerte der Wärmeleitfähigkeit von Aluminium bei verschiedenen Temperaturen [12]

	Wärmeleitfähigkeit / $\frac{W}{m \cdot K}$	Temperatur / $^{\circ}C$
Aluminium	230	-100
Aluminium	220	0
Aluminium	205	200
Aluminium	193	400

5.3 Verhalten der Messwerte des Setups unter verschiedenen Umständen

Im Folgenden werden einige Messungen zum besseren Verständnis des Setups durchgeführt, welche vor allem mögliche Fehlerquellen und ihre Erklärungen enthalten.

5.3.1 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur der Kalorimeter

Aus den vorherigen Messungen geht hervor, dass durch Schwarzkörperstrahlung eine Änderung der Leistung in den Kalorimetern entsteht. Um das genauer zu untersuchen, wird eine Messung durchgeführt, in welcher die in die Kalorimeter eingespeiste Leistung unverändert bleibt und nur die Kühlleistung des Peltier-Elements verringert wird, wodurch nur die Gesamttemperatur der Kalorimeter verändert wird. In Abb. 5.6 sind die Messergebnisse dargestellt.

Zu sehen ist, bei den aus der Messung berechneten Werten, ein klarer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von $185 \frac{W}{m \cdot K}$ auf $240 \frac{W}{m \cdot K}$. Dieser Anstieg ist jedoch genau gegenläufig zur Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit von Aluminium, welche mit steigender Temperatur sinken sollte (s. Tabelle 5.1). Zudem ist der Anstieg zu stark für den einer Wärmeleitfähigkeit und muss somit einem Fehler im Setup oder der Berechnung entspringen.

Der Grund hierfür liegt im Strahlungsaustausch mit der Umgebung, welcher mit dem Kalorimeter entsteht. Da bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit diese nicht einbezogen werden, stimmt das Verhältnis $\lambda \propto \frac{P}{\Delta T}$ nicht mehr, da die Leistung unter- oder überschätzt ist für das gemessene ΔT . Hinzu kommt, dass die Strahlungsleistung mit $P \propto T^4$ geht, wodurch ein geringer Unterschied in der Temperatur

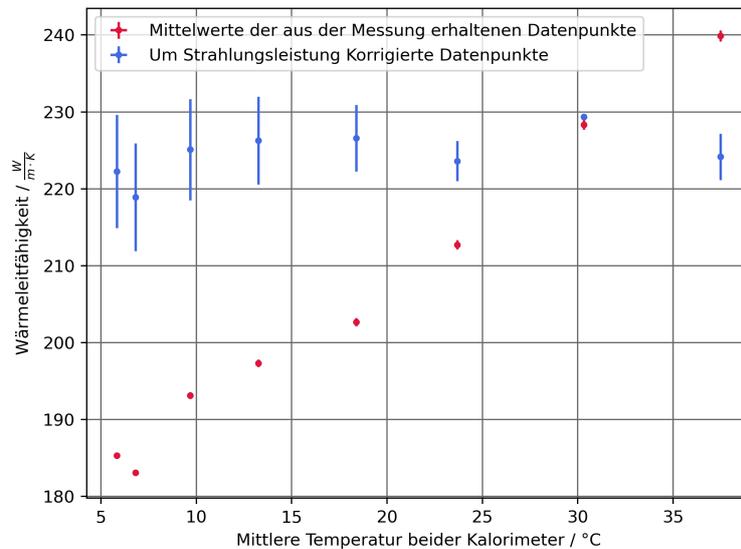


Abbildung 5.6: Berechnete Wärmeleitfähigkeit des oberen Kalorimeters in Abhängigkeit von der Temperatur der Kalorimeter sowie die um die Strahlungsleistung korrigierten Werte

der Kalorimeter stärker ins Gewicht fällt.

Um die Strahlungseinflüsse aus der Messung herauszurechnen, ist das Temperaturgefälle in den Kalorimetern als linear annehmbar, wodurch über die beiden Temperatursensoren eine Temperatur-Gerade für die beiden Kalorimeter erstellt werden kann. Diese kann dann in die Schwarzkörper-Gleichung aus Kapitel 4.6 $P = \sigma A \cdot (T_{\text{Kalorimeter}}^4 - A_{\text{eff}} T_{\text{Umgebung}}^4)$ eingesetzt werden und danach integriert werden. Hierbei wird die Umgebungstemperatur als annähernd konstant bei 24°C angenommen und die effektive Fläche, welche ebenfalls in Kapitel 4.6 ermittelt wurde, mit $(0,00932 \pm 0,00031)\text{m}^2$ eingesetzt.

Die Integration zur Berechnung der Leistung ist mit

$$P = \sigma \left(\pi \cdot r \cdot \int T^4(x) dx - A_{\text{eff}} \cdot T_{\text{Umgebung}}^4 \right) \quad (5.1)$$

durchführbar.

Mit den errechneten Strahlungseinflüssen aus dieser Rechnung kann die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit korrigiert werden, indem diese von der über den Heizkörper eingespeisten Leistung abgezogen wird, was ebenfalls in Abb. 5.6 zu sehen ist.

Bei den so um die Strahlungseinflüsse korrigierten Werten, ist zu sehen, dass die Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Fehler konstant bleibt. Zu erwarten wäre hierbei ein leichter Abfall der Werte, jedoch wird dazu in einem zu kleinen Temperaturbereich gemessen, um einen solchen gut erkennen zu können. Zudem sind die Schwankungen und Fehler der Werte relativ groß, was das Erkennen einer solchen Verringerung der Wärmeleitfähigkeit erschwert.

Zusätzlich fällt auf, dass die korrigierte Wärmeleitfähigkeit ungefähr bei $225 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ konstant ist, was nahe an dem Literaturwert bei 0°C von $220 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ liegt.

Der Effekt der Schwarzkörperstrahlung auf die gemessene Wärmeleitfähigkeit ist groß und erschwert, wie in Kapitel 3.4.3 erwähnt, die Messung absoluter Werte. Jedoch lässt sich der Effekt durch die in

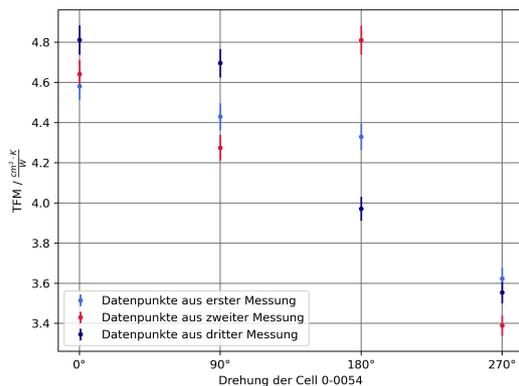


Abbildung 5.7: TFM der Zelle 54, wobei bei jeder Messung die Zelle herausgenommen und wieder eingesetzt wird

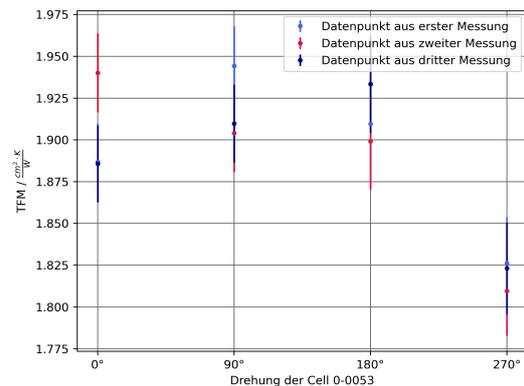


Abbildung 5.8: TFM der Zelle 53 mit Soft-PGS, wobei bei jeder Messung die Zelle herausgenommen und wieder eingesetzt sowie das Soft-PGS getauscht wird

Kapitel 4.6 gemachte Messung in guter Näherung korrigieren.

5.3.2 TFM der Bare Cell bei Wiederholungsmessungen mit und ohne Soft-PGS

In den vorherigen Kapiteln (s. Kapitel 5.1) wird festgestellt, dass es zu Unterschieden in der gemessenen TFM kommt, wenn man keine Füllmaterialien verwendet. Ohne Verwendung eines DUTs, hier wird nur Aluminium gegen Aluminium gepresst, ist dies sehr deutlich zu erkennen. Um zu überprüfen wie stark sich dieser Effekt fortsetzt, wenn ein DUT getestet wird und wie sehr das Soft-PGS diesen Effekt minimiert, werden zwei Messreihen mit Bare Cell's durchgeführt.

Bei der ersten Messreihe werden die Bare Cell 54 ohne Soft-PGS vermessen. Um dabei den Effekt wie bei Aluminium auf Aluminium zu sehen, werden nach jeder Messung die Bare Cell aus dem Setup herausgenommen und neu eingesetzt. Außerdem wird die Bare Cell nach je drei Messungen um 90° gedreht um Unterschiede der TFM bei der Ausrichtung der Bare Cell festzustellen, welche durch eine Schräge der Bare Cell oder der Aluminiumstäbe entstehen könnten. Dieselbe Messung wird dann nochmal mit Soft-PGS zwischen der Bare Cell und den Kalorimetern gemacht, da es als Füllmaterial dient und seine Form unter Druck anpasst, wodurch Luftblasen oder andere Unregelmäßigkeiten verringert werden. Für diese Messung wird die Zelle 53 verwendet, weil die Zelle 54 nach der Messung ohne Soft-PGS physische Veränderungen aufweist, worauf später genauer eingegangen wird.

In Abb. 5.7 ist die erste Messung ohne Soft-PGS zu sehen und in Abb. 5.8 ist die zweite Messung mit Soft-PGS zu sehen.

Es fällt sofort auf, dass bei der Messung ohne Soft-PGS die TFM sehr stark schwankt und in einem Bereich von $\Delta TFM = 1,4 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$ liegt, während bei der Messung mit Soft-PGS die TFM in einem Intervall von $\Delta TFM = 0,15 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$ liegt, was nur etwa einem Zehntel des Bereiches ohne Soft-PGS entspricht. Zudem liegen bei der Messung mit Soft-PGS die Werte in einer bestimmten Ausrichtung auch deutlich näher zusammen und sind maximal $\Delta TFM = 0,05 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$ voneinander entfernt, während sie ohne Soft-PGS bei der Ausrichtung von 180° fast $\Delta TFM = 0,9 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$ auseinander liegen. Zwar ist dieser Wert das Maximum, jedoch liegen auch in anderen Ausrichtungen die Werte ungefähr $0,2-0,4 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$

auseinander und sind somit deutlich höher als bei der Messung mit Soft-PGS.

Somit bestätigen die Messungen die Vermutung, dass ohne Soft-PGS die Wärmeleitfähigkeit extrem schwankt, was auf die rauen Oberflächen und die damit eingeschlossenen Luftblasen und den dadurch schlechteren Kontakt zwischen den Oberflächen zurückzuführen ist. Die Bestimmung der TFM einer Bare Cell ist somit ohne Soft-PGS (oder ein anderes geeignetes Thermales Interface Material) nicht reproduzierbar.

Ebenfalls ist zu sehen, dass das Soft-PGS zwischen dem Base Block und dem Cooling Block des Bare Local Support die TFM halbiert hat und somit für eine stark verbesserte Wärmeübertragung sorgt.

Auffällig bei der Messung ohne Soft-PGS ist, dass die TFM konstant sinkt und somit immer besser die Wärme zu leiten scheint. Dies ist nicht alleine durch die Ausrichtung der Zelle zu begründen, sondern rührt daher, dass die Zelle 54 ohne den Einsatz von Soft-PGS physisch verändert wird. Zum Schluss der Messung war ein runder Abdruck des oberen Kalorimeters auf der Pyrolytischen Graphit Platte zu beobachten. Dieser erklärt die konstante Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit, da hierdurch die raue Fläche des Pyrolytic Graphite Tile geglättet wird und besseren Kontakt mit dem Aluminium herstellen kann. Dieser Effekt ist bei der Messung mit Soft-PGS nicht zu beobachten und lässt darauf schließen, dass das Soft-PGS nicht nur für eine bessere Wärmeleitfähigkeit sorgt, sondern auch die Bare Cell vor zu großem Druck und Veränderung der Pyrolytischen Graphit Platte schützt.

5.3.3 Messungen mit und ohne Vakuum

Im Aufbau (s. Kapitel 3.1) wird beschrieben, dass das Setup in einem Vakuumbehälter betrieben wird, um thermische Verluste an die Luft zu verringern. Um diese Hypothese zu überprüfen, wird die Bare Cell CERN-09 mit und ohne Vakuum vermessen.

Da das Vakuum nicht nur zur Verminderung der thermischen Verluste dient, sondern auch die Kondensation von Wasser an den Kalorimetern verhindert, müssen diese Tests bei höheren Temperaturen durchgeführt werden, um das Setup vor Wasserbildung und somit möglicher Korrosion zu schützen. Hierzu werden ungefähr 10°C als Temperatur des unteren Temperaturreervoirs und 30°C als Temperatur des oberen Temperaturreervoirs angestrebt.

Um nun vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden zwei Messungen mit Vakuumbehälter bei erhöhter Temperatur, eine ohne Vakuumbehälter bei erhöhter Temperatur und eine weitere Messung bei den normalerweise angestrebten Temperaturen von -10°C unten und 20°C oben mit Vakuumbehälter durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abb. 5.9, wo die TFM der Bare Cell dargestellt ist und in Abb. 5.10, wo die Wärmeleitfähigkeit des oberen Aluminiumstabes dargestellt ist, zu sehen.

Beim Betrachten der Graphen ist zu erkennen, dass die erhöhten Temperaturen die Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums steigern und die TFM der Bare Cell fallen lassen, im Gegensatz zu einer Messung bei kalten Temperaturen. Beim Vergleich dieser Werte mit den Literaturwerten (s. Tabelle 5.1) fällt auf, dass hierbei der gleiche Trend wie in Kapitel 5.3.1 zu beobachten ist. Da bei der wärmeren Messung die Umgebung und das Kalorimeter fast dieselbe Temperatur haben, ist der Wärmeaustausch hierbei geringer und die vom Heizkörper eingespeiste Leistung liegt näher an der reell durch den Stab geleiteten Leistung. Da nun die Leistung im Fall der niedrigeren Temperaturen unterschätzt wird, wird Dank des Verhältnisses $\lambda \propto \frac{P}{\Delta T}$ die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls unterschätzt, wodurch sie geringer ist als bei der Messung mit höheren Temperaturen.

Aus den gemessenen Werten können nun die Leistungsgewinne, die dem Kalorimeter bei der Messung mit niedrigen Temperaturen mindestens durch die Umgebung hinzugeführt werden, errechnet werden. Dazu wird die Formel 3.3 verwendet und nach der Leistung umgestellt zu $P = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{l}$. Mit den Werten

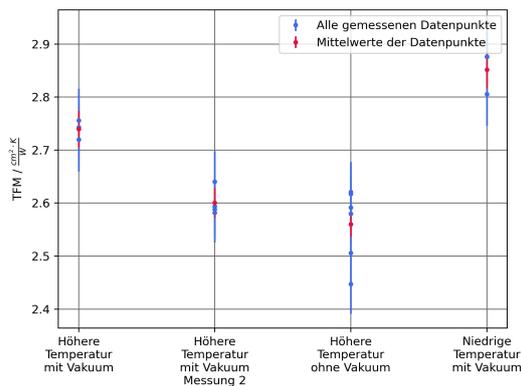


Abbildung 5.9: TFM der Bare Cell CERN-09 im Vergleich mit und ohne Vakuum

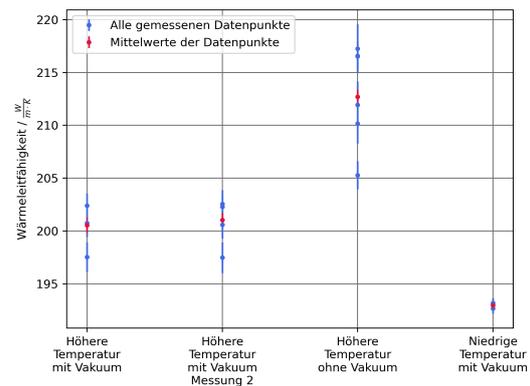


Abbildung 5.10: Wärmeleitfähigkeit des oberen Kalorimeters im Vergleich mit und ohne Vakuum

$l = 0,05\text{m}$, $A = 0,01^2 \cdot \pi$, $\lambda = 202$ und $\Delta T = 11,01^\circ\text{C}$ ergibt sich dann eine Leistung von $13,97\text{W}$, welche $4,8\%$ höher als die vom Heizkörper produzierte Leistung von $13,33\text{W}$ liegt. Dies lässt auf mindestens $0,64\text{W}$ an aufgenommener Leistung aus der Umgebung schließen.

Bei der Messung fällt außerdem auf, dass die Genauigkeit unter den erhöhten Temperaturen schlechter wird und die Fehler anwachsen. Dieser Effekt ist noch einmal stärker bei der Messung ohne Vakuum zu sehen, wo die Werte Differenzen von ungefähr $\Delta\text{TFM} = 0,3 \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$ erreichen. Extrem ist dieser Unterschied vor allem bei der Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums zu beobachten, wo aus einer Differenz bei kalten Temperaturen im Vakuumbehälter von $\Delta\text{TFM} = 1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ eine Differenz von $\Delta\text{TFM} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ ohne Vakuumbehälter entsteht. Dieser Unterschied lässt sich durch den konstanten Wärmeaustausch mit der Luft erklären, welcher zu größeren Schwankungen in der Messung von ΔT führt, da die Pt100 Temperatursensoren sehr empfindlich sind.

Dies wird deutlich, beim Vergleich von Abb. 5.11, in der die Temperaturänderung einer Messung mit Vakuum bei niedrigen Ziel-Temperaturen dargestellt ist, mit Abb. 5.12, in der eine Messung bei höheren Ziel-Temperaturen ohne Vakuum dargestellt ist. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Temperaturschwankungen ohne Vakuum größer sind. Außerdem ist zu erkennen, dass die Schwankungen in Abb. 5.12 für alle Temperatur-Sensoren gleich sind und sie alle gleiche Veränderungen der Temperatur messen. Das lässt darauf schließen, dass die Schwankungen durch den Austausch mit der Luft entstehen, welche in guter Näherung als homogen auf der Länge der beiden Kalorimeter angenommen werden können, die sich dann z.B durch Luftstöße im Gesamten ändern.

Aus den Messungen lässt sich nicht direkt ableiten, ob der Vakuumbehälter ein ausreichendes Vakuum erzeugt, um den Wärmeaustausch mit der Luft zu verhindern. Jedoch ist klar zu sehen, dass der Vakuumbehälter für eine konstantere Umgebungstemperatur sorgt und Luftzüge verhindert, wodurch die Fehler der Messung minimiert und Schwankungen gesenkt werden.

5.4 Prototyp Bare Cell

Um die TFM der Bare Cells zu bestimmen, wird jeweils eine Scheibe Soft-PGS zwischen das obere Kalorimeter und den Cooling Block sowie das untere Kalorimeter und das Pyrolytic Graphite Tile der Bare Cell eingebaut.

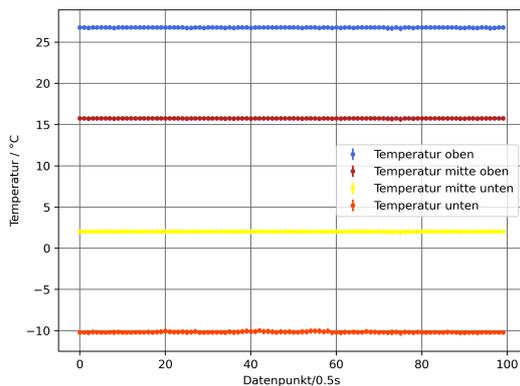


Abbildung 5.11: Temperaturkurve einer Messung der Bare Cell CERN-09 bei niedrigen Temperaturen mit Vakuumbehälter

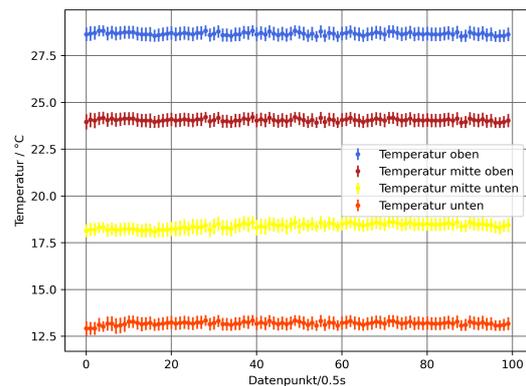


Abbildung 5.12: Temperaturkurve einer Messung der Bare Cell CERN-09 bei hohen Temperaturen ohne Vakuumbehälter

Dieser Aufbau kommt dem am nächsten wie die Bare Cell im Local Support eingebaut sein wird, da zwischen Cooling- und Base-Block ebenfalls Soft-PGS verbaut sein wird (s. Kapitel 2.2.3). Das weitere Soft-PGS zwischen dem Pyrolytic Graphite Tile und dem Aluminiumstab wird hinzugefügt, um Schwankungen durch die Unebenheiten der beiden Materialien zu verringern, sowie die zu testende Bare Cell vor physischen Veränderungen durch den auf ihr lastenden Druck zu schützen. Diese Erkenntnisse sind aus der in Kapitel 5.3.2 durchgeführten Messreihe hervorgegangen.

Da im Aufbau Soft-PGS verwendet wird, ist es für eine vergleichbare Messung notwendig einen ähnlichen Druck auf das DUT auszuüben sowie das Soft-PGS nach jedem Druckablass zu erneuern. Um die Messung konstant zu halten, wird mit der Schraube ein Gewicht von ungefähr 200N auf das DUT wirken lassen, was für das DUT ungefähr einem Druck von 625kPa entspricht, da es auf einer Kreisfläche mit einem Radius von 0,01m belastet wird.

In Abb. 5.13 sind die Ergebnisse der Messungen zu sehen. Abgebildet ist die TFM von 10 Prototypen aus der Produktion der Universität Bonn und zwei Modell Bare Cells, produziert am CERN.

An den Ergebnissen ist sehr gut sichtbar, dass die meisten an der Universität Bonn hergestellten Bare Cells eine TFM von ungefähr $1,8 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$ haben. Dieses Ergebnis ist gut, da das Ziel der Messung eine Vergleichsmessung zwischen Modellen und hergestellten Cells werden soll. Die einzige von diesem Wert abweichende ist Zelle 55, welche eine TFM von ungefähr $2,2 \frac{\text{K}\cdot\text{cm}^2}{\text{W}}$ hat.

Ebenso sind bei einer zweiten Messreihe nur leichte Abweichungen zu den Messungen der ersten Messreihe aufgetreten. Das bestätigt die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und somit die Funktionalität des Setups.

Zudem fällt auf, dass die Modell Bare Cells des CERNs eine höhere TFM als die an der Universität Bonn produzierten Bare Cells haben. Dies ist jedoch zu erwarten, da die Modellzellen des CERNs eine dickere Klebeschicht besitzen. Diese wurde auf 100µm angesetzt, während die an der Universität Bonn produzierten nur noch eine von 25µm besitzen sollen.

In Kapitel 2.2.3 wird darauf hingewiesen, dass die Dicke der verschiedenen Bestandteile der Bare Cell vermessen werden. Hieraus ist die Dicke der Klebeschicht bestimmbar, welche dann gegen die TFM aufgetragen wird. Dies ist in Abb. 5.14 zu sehen.

Dabei ist vor allem auffällig, dass die Zelle 55 mit ihrer relativ schlechten TFM keine deutlich dickere

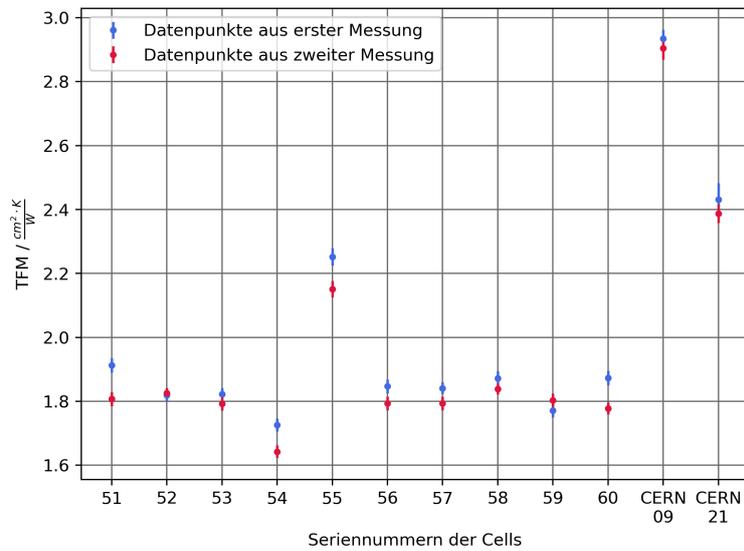


Abbildung 5.13: TFM der vermessenen Prototyp Bare Cell's und zwei Vergleichs Bare Cell's des CERNs

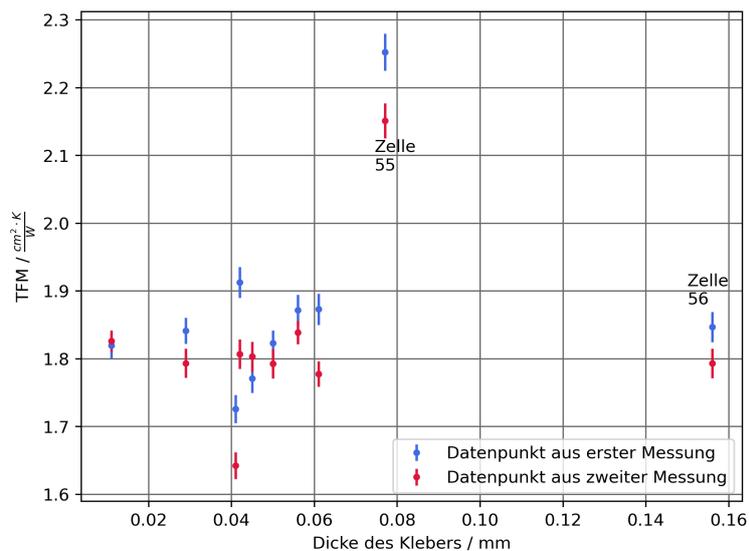


Abbildung 5.14: TFM der vermessenen Prototyp Bare Cell's im Vergleich mit ihrer Dicke

Klebeschicht als die anderen produzierten Zellen hat. Das lässt darauf schließen, dass entweder beim Auftragen des Klebers Luftlöcher oder etwaige andere Fehler entstanden sind oder die Mischung des Klebers, der bei dieser Zelle verwendet wurde, nicht gut war.

Zu sehen ist jedoch auch, dass eine der Zellen, genauer Zelle 56, eine fast doppelt so dicke Klebeschicht als die anderen besitzt und trotzdem eine ähnlich gute TFM aufweist, wie die anderen Zellen. Daraus lässt sich schließen, dass die Zelle entweder gut geklebt ist und kaum Luftlöcher sowie andere Verunreinigungen besitzt, oder, entgegen der Annahme, die Abhängigkeit der Dicke mit der Wärmeleitfähigkeit nicht ins

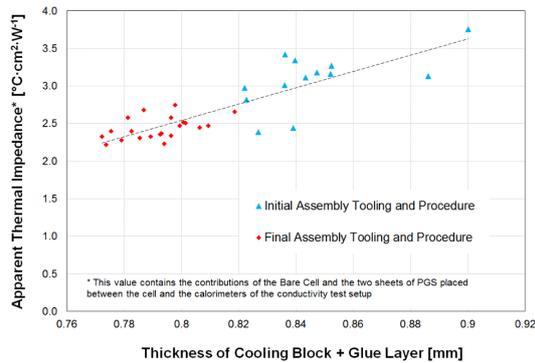


Abbildung 5.15: Am CERN gemessenes Verhalten der TFM gegen die Dicke des Cooling Blocks und des Klebers [1]

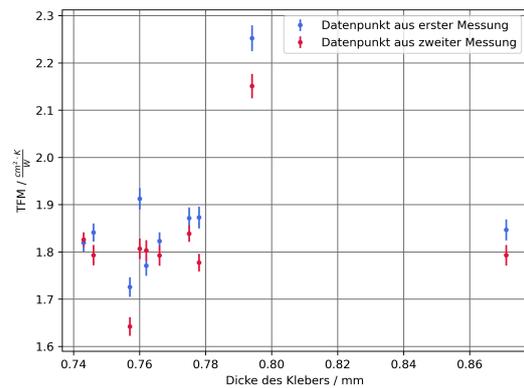


Abbildung 5.16: Gemessenes Verhalten der TFM gegen die Dicke des Cooling Blocks und des Klebers

Gewicht fällt.

Um dies zu überprüfen, ist in Abb. 5.15 die am CERN gemessene Abhängigkeit der TFM von der Dicke des Cooling Blocks und des Klebers zu sehen und in Abb. 5.16 ist die gemessene Abhängigkeit der TFM von der Dicke des Cooling Blocks und des Klebers zu sehen.

Das am CERN gemessene Verhalten der TFM zeigt einen linearen Anstieg, jedoch ist dieser nicht perfekt und es gibt eine große Wolke an Datenpunkten um die angelegte Gerade. Aus dem Vergleich der beiden Graphen lässt sich schließen, dass die beiden Zellen 55 und 56 der an der Universität Bonn hergestellten Prototypen Ausreißer sind und somit keinen Widerspruch zur festgestellten Abhängigkeit der TFM von der Dicke des Cooling Blocks und des Klebers darstellen.

Fazit und Ausblick

In der Arbeit wird ein Setup zur Qualitätskontrolle der Bare Cell getestet und in Betrieb genommen, mit dem die Wärmeleitfähigkeit der Bare Cell getestet und mit anderen Referenzzellen verglichen werden soll. Zudem sollten unterschiedliche Tests durchgeführt werden, um die Genauigkeit der Messungen zu optimieren und besser zu verstehen.

Die Inbetriebnahme und das Testen des Setups zur Qualitätskontrolle hat ergeben, dass das Setup unter ähnlichen äußeren Bedingungen die relative Wärmeleitfähigkeit eines DUTs zu einem Vergleichswert bestimmen kann und in mehreren Tests reproduzieren kann. Ebenfalls werden erfolgreiche Abschätzungen über Fehlerquellen und äußere Einflüsse gemacht, wie z.B über den Leistungsaustausch des Setups mit der Umgebung und den Einfluss des Vakuums auf die Reproduzierbarkeit der Messungen. Mit diesen Abschätzungen könnte dann in darauf folgenden Messungen ein absoluter Wert der Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden, der mit dem Literaturwert gut übereinstimmt. Zudem wird ein Graphisches Benutzer Interface erstellt, mit dem die Bedienung und Auslese des Setups erleichtert wird.

Mögliche Verbesserungen des Setups belaufen sich vorrangig auf die Ausleseelektronik, da diese aus frei liegenden Kabeln besteht und die verwendeten ADCs über die unzureichend genaue und rauschende 3,3V-Schiene des *Raspberry pi* versorgt werden, wodurch ebenfalls Schwankungen in der Messung der Spannungen entstehen. Lösbar wäre dies, indem eine Leiterplatte (Printed Circuit Board oder PCB) für die Ausleseelektronik designt wird, in dem die Spannungsversorgung der ADCs besser vor Rauschen geschützt ist.

Um genauere absolute Werte mit dem Setup bestimmen zu können, wären weitere und genauere Untersuchungen zum Leistungsaustausch mit der Umgebung nötig. Es ist jedoch möglich, dass mit dem zur Verfügung stehenden Setup keine hinreichende Genauigkeit zur Bestimmung absoluter Werte möglich ist.

Das Ziel der Bachelorarbeit, das Setup zur Qualitätskontrolle der Bare Cell in Betrieb zu nehmen und für die Kontrolle der an der Universität Bonn produzierten Bare Cells vorzubereiten, ist erreicht. Zudem wird es darauf vorbereitet absolute Messwerte der Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Der LHC und seine großen Experimente [3]	2
2.2	ATLAS-Experiment	3
2.3	Der Innere Detektor des ATLAS-Experiments [3]	4
2.4	Aufbau des ITk-Detektors. In rot ist der ITk-Pixel-Detektor und in blau ist der ITk-Streifen-Detektor dargestellt [4]	5
2.5	Aufteilung des ITk-Pixel Detektors [1] in das Inner System, das Outer Barrel und die Endcap	6
2.6	Halbierte Anordnung der Quad-Module in zylindrischer Ausrichtung im Outer Barrel (<i>Flat Section</i>) [1]	6
2.7	Halbierte Anordnung der Quad-Module in Kreisring Ausrichtung im Outer Barrel (<i>Inclined Rings Section</i>) [1]	6
2.8	Outer Barrel Bare local Support der Flat Section Explosionszeichnung [1]	7
2.9	Soft-PGS auf dem Bare local Support [1]	7
2.10	Veränderung des Wärmewiderstands des Soft-PGS unter Druck [5]	7
2.11	Outer Barrel Bare Local Support der Inclined Rings Section Explosionszeichnung [1]	8
2.12	Leistungsverteilung eines ITk-Pixel-Moduls	9
2.13	Outer Barrel Bare Module Cell Explosionszeichnung [1]	10
2.14	Temperaturverteilung eines ITK-Pixel-Moduls in einem Benchmark-Szenario [1]	10
2.15	Temperatur Simulation eines ITk-Pixel-Moduls [1]	11
3.1	Konstruktionszeichnung des Setups zur Qualitätskontrolle der Bare Cells [1]	14
3.2	Bild des finalen Aufbaus des Setups	14
3.3	Das Setup mit Vakuumbehälter	15
3.4	Stromkreis der Lastzelle [7]	16
3.5	Schematische Zeichnung eines Peltier-Elements [9]	17
3.6	Bild des Aufbaus der Ausleseelektronik	18
3.7	Schematische Zeichnung zur Berechnung des thermischen Widerstands	20
4.1	Kalibrationsmessung eines ADCs bei einer Spannungsmessung über einen Messpin mit einem Spannungsmessbereich von 4,096V	23
4.2	Kalibrationsmessung eines ADCs bei einer differentiellen Spannungsmessung über zwei Messpins mit einem Spannungsmessbereich von 4,096V	23
4.3	Kalibrationsaufbau Lastzelle	24
4.4	Kalibrationsgerade der Verbauten Lastzelle bei 5V	25
4.5	Kalibrationsgerade der Vergleichs-Lastzelle bei 5V	25

4.6	Kalibrationsgerade der verbauten Lastzelle bei 4V	26
4.7	Kalibrationsgerade der verbauten Lastzelle bei 5V	26
4.8	U-I-Kurve der Widerstände	27
4.9	Das GUI im Messbetrieb	28
4.10	Feder mit und ohne Metall Pin	29
4.11	Änderung des Drucks auf das DUT durch die Schraube	30
4.12	Druckabhängigkeit der Temperatur im Bereich der Druckausübung durch den Metall Pin	31
4.13	Die in das obere Kalorimeter eingespeiste Leistung gegen die mittlere Temperatur des oberen Kalorimeters	32
5.1	Messung der Wärmeleitfähigkeit gegen den ausgeübten Druck ohne DUT	35
5.2	Wiederholungsmessung der Wärmeleitfähigkeit gegen den ausgeübten Druck ohne DUT	35
5.3	Wärmeleitfähigkeit des oberen Aluminiumstabes gegen den ausgeübten Druck	36
5.4	Veränderung der TFM des Soft-PGS unter Druck [5]	37
5.5	Veränderung der TFM des Soft-PGS unter Druck vermessen mit dem Setup	37
5.6	Berechnete Wärmeleitfähigkeit des oberen Kalorimeters in Abhängigkeit von der Temperatur der Kalorimeter sowie die um die Strahlungsleistung korrigierten Werte	38
5.7	TFM der Zelle 54, wobei bei jeder Messung die Zelle herausgenommen und wieder eingesetzt wird	39
5.8	TFM der Zelle 53 mit Soft-PGS, wobei bei jeder Messung die Zelle herausgenommen und wieder eingesetzt sowie das Soft-PGS getauscht wird	39
5.9	TFM der Bare Cell CERN-09 im Vergleich mit und ohne Vakuum	41
5.10	Wärmeleitfähigkeit des oberen Kalorimeters im Vergleich mit und ohne Vakuum	41
5.11	Temperaturkurve einer Messung der Bare Cell CERN-09 bei niedrigen Temperaturen mit Vakuumbehälter	42
5.12	Temperaturkurve einer Messung der Bare Cell CERN-09 bei hohen Temperaturen ohne Vakuumbehälter	42
5.13	TFM der vermessenen Prototyp Bare Cell's und zwei Vergleichs Bare Cell's des CERNs	43
5.14	TFM der vermessenen Prototyp Bare Cell's im Vergleich mit ihrer Dicke	43
5.15	Am CERN gemessenes Verhalten der TFM gegen die Dicke des Cooling Blocks und des Klebers [1]	44
5.16	Gemessenes Verhalten der TFM gegen die Dicke des Cooling Blocks und des Klebers	44

Literatur

- [1] ATLAS Collaboration. *Design Overview of the Bare Local Supports for the ITk Pixel Outer Barrel*. AT2-IP-ER-0013. CERN, Okt. 2021.
- [2] M. Hamer.
- [3] F. Hinterkleuser. „Evaluation of a serial powering scheme and its Building blocks for the atlas itk pixel detector“. BONN-IR-2022-09. PhD Thesis. University of Bonn, 2022.
- [4] ATLAS Collaboration. *Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Strip Detector*. CERN, Apr. 2017.
- [5] *Datenblatt Soft-PGS*. URL: <https://industrial.panasonic.com/ww/pgs2/soft-pgs>. 1-9-2022.
- [6] *Piezo-Effekt*. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Piezoelektrizit%C3%A4t.html>. 7-9-2022.
- [7] *Datenblatt der Lastzelle*. URL: <https://docs.rs-online.com/2859/0900766b8142cddb.pdf>. 06-11-2022.
- [8] *Pt100 Funktionsweise*. URL: https://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/gpalt/Anleitungen/Ergaenzungen/A7_Temperaturmessung/Platin_Widerstandsthermometer.pdf. 9-9-2022.
- [9] *Skizze Peltier-Element*. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/Peltierelement_Schemazeichnung.png. 7-9-2022.
- [10] *Peltier-Element Funktionsweise*. URL: <https://de.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideen-und-tipps/peltier-module-leitfaden>. 7-9-2022.
- [11] *Datenblatt des Netzgeräts*. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HMP_dat_de_5215-4981-31_v0200.pdf. 06-11-2022.
- [12] *Wärmeleitfähigkeit Aluminium*. URL: https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_metall/wleit_metall.php. 13-10-2022.