

**Inbetriebnahme und Messung an dem  
CO<sub>2</sub>-Kühlsystem MARTA für Qualitätskontrollen  
in der ITk-Pixeldetektorproduktion**

Dominik Hauner

Bachelorarbeit in Physik  
angefertigt im Physikalischen Institut

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

Aug 2023

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

---

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Der ITk-Detektor für das ATLAS Phase II Upgrade</b>	<b>2</b>
2.1	Large Hadron Collider . . . . .	2
2.2	Das ATLAS Experiment . . . . .	3
2.2.1	Inner Detector . . . . .	3
2.2.2	ITk-Detektor . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Biphasenkühlung und Umsetzung in MARTA</b>	<b>6</b>
3.1	Einzel- und Biphasenkühlung . . . . .	6
3.2	Biphasenkühlung mit Akkumulator . . . . .	8
3.3	I-2PACL in MARTA . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau und Komponenten</b>	<b>11</b>
4.1	Versuchsaufbau . . . . .	11
4.2	Komponenten des Aufbaus . . . . .	14
4.2.1	MARTA . . . . .	14
4.2.2	Widerstände und Netzteile . . . . .	15
4.2.3	Temperatursensoren . . . . .	16
4.3	Datenverarbeitung . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Charakterisierung von MARTA</b>	<b>21</b>
5.1	Entwicklung der Messmethodik . . . . .	21
5.2	Vermessung der maximalen Kühlleistung . . . . .	24
5.3	Abhängigkeit der Kühlleistung von der CO <sub>2</sub> -Flussrate . . . . .	25
5.4	Ergebnisse für die ITk-Pixeldetektoren Qualitätskontrolle . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>28</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>29</b>
	Literatur	34
	Abbildungsverzeichnis	37
	Tabellenverzeichnis	41

---

## Einführung

---

Im Zuge des Ausbaus des Large Hadron Colliders (LHC) zum High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) wird der Inner Detector (ID) des ATLAS Experiments durch den Inner Tracker(ITk)-Detektor ersetzt, welcher vollständig aus Silizium-Pixeldetektoren und -Streifendetektoren besteht.

Der ITk-Pixeldetektor wird aus Pixeldetektormodulen bestehen, welche von mechanischen Trägerstrukturen, den Local Supports, getragen werden. An der Universität Bonn wird ein Teil dieser Trägerstrukturen mit Detektormodulen bestückt und final getestet. Für diese Qualitätskontrolle sollen die Detektormodule mit dem CO<sub>2</sub>-Kühlsystem MARTA<sup>1</sup> gekühlt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Inbetriebnahme des Kühlsystems MARTA, sowie dessen Charakterisierung durch Bestimmung der maximalen Kühlleistung. MARTA beruht auf dem Prinzip des integrierten akkumulatorregulierten Biphasen Kühlkreislaufes, kurz I-2PACL<sup>2</sup>.

In dieser Arbeit werden zunächst die Hintergründe des HL-LHC und die Notwendigkeit des neuen ITk-Detektors beschreiben. Ebenso folgt eine Einführung in Biphaskühlsysteme. Anschließend wird der Versuchsaufbau sowie die einzelnen Komponenten, vor allem MARTA, in deren Funktionsweise und Umsetzung beschrieben. Letztlich werden Messungen zur Bestimmung der maximalen Kühlleistung von MARTA durchgeführt und die Ergebnisse im Hinblick auf die Qualitätskontrollen der ITk-Pixeldetektoren diskutiert.

---

<sup>1</sup>engl. *Monoblock Approach for a Refrigeration Technical Application*

<sup>2</sup>engl. *Integrated 2-Phase Accumulator Controlled Loop*

---

## Der ITk-Detektor für das ATLAS Phase II Upgrade

---

Es folgt eine kurze Einführung zu dem HL-LHC Upgrade. Daraufhin wird das ATLAS Experiment, vor allem der ID, etwas genauer beschrieben. Und zuletzt wird der Aufbau des ITk-Detektors kurz erläutert.

### 2.1 Large Hadron Collider

Der Large Hadron Collider (LHC) [1] nahe Genf in der Schweiz ist der leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt und Teil der europäischen Kernforschungsorganisation CERN. Der LHC kann Protonen auf eine Schwerpunktsenergie von rund 14 TeV beschleunigen und die Kollisionen lassen sich an vier primären Experimenten ALICE [2], ATLAS [3], CMS [4] und LHCb [5] beobachten. In Abbildung 2.1 ist eine Skizze der Lage des LHC mit den vier Experimenten zu sehen.

Im Zuge der Aufrüstung zum HL-LHC (High Luminosity-LHC), soll die Luminosität  $L$  um das 7,5 Fache verbessert werden. Dies erhöht die Rate an Proton-Proton Kollisionen  $\dot{N}$  mit dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  gemäß  $\dot{N} = \sigma L$  auf ca. 200 Kollisionen pro Paket-Kreuzung. Diese zusätzlichen Kollisionen erhöhen die Datenmenge, die am LHC in der vorgesehenen Betriebsdauer gesammelt wird und auf seltene Prozesse zur weiteren Erforschung des Standardmodells untersucht werden kann.

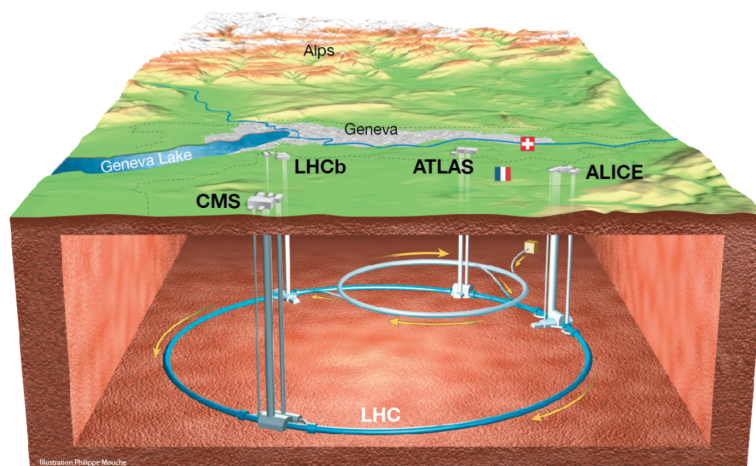


Abbildung 2.1: Skizze des LHC mit der Lage der vier großen Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb. [6]

## 2.2 Das ATLAS Experiment

Der ATLAS Detektor [3] ist der größte Teilchendetektor, der je für einen Teilchenbeschleuniger gebaut wurde, und trägt zu bahnbrechenden Entdeckungen, wie der des Higgs-Bosons [7], bei.

Der ATLAS Detektor wurde als Universaldetektor konzipiert und besteht aus einer Vielzahl an Subsystemen, welche in Abbildung 2.2 gezeigt sind. Die äußeren Myonenkammern mit den Toroid-Magneten dienen dabei der Detektion und Impulsbestimmung von Myonen. Die Kalorimeter bestimmen die Energie von Hadronen sowie elektromagnetisch wechselwirkender Teilchen. Von besonderer Bedeutung für diese Arbeit ist der im Bild rot markierte Inner Detector (ID) innerhalb der Solenoid-Magneten, zur präzisen Bestimmung der Flugbahn der Teilchen und Rekonstruktion der Vertices.

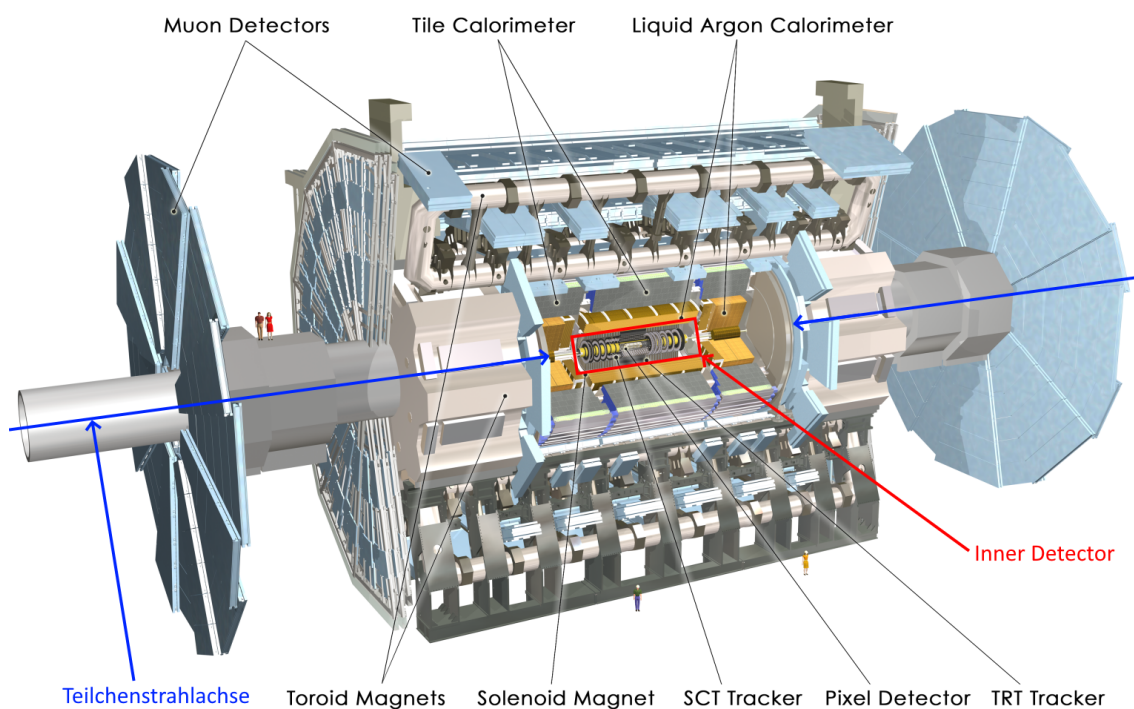


Abbildung 2.2: Computergeneriertes Bild des ATLAS Detektors, mit Menschen als Maßstab. ATLAS besteht aus zahlreichen Magneten, Kalorimetern und Detektoren, die jeweils auf die Detektion unterschiedlicher Teilchen wie Photonen, Hadronen oder Myonen ausgelegt sind und deren Gesamtenergie, Impuls, sowie Ursprung ermitteln. Von besonderer Bedeutung ist jedoch der in rot markierte Inner Detector bestehend aus den Pixel-, SCT- und TRT-Detektoren. Bild modifiziert aus [8].

### 2.2.1 Inner Detector

Ein detaillierteres computergeneriertes Bild des Inner Detectors (ID) [9] von ATLAS ist in Abbildung 2.3 zu sehen. Der ID besteht im Wesentlichen aus drei Lagen Silizium-Pixel-Detektoren (Pixels), vier Schichten Silizium-Streifen-Detektoren (SCT) und rund 300 000 gasgefüllten Detektorröhren (TRT). Noch dazu wurde 2014 das Insertable-B-Layer (IBL) [10] als zusätzliche Lage an Pixeldetektoren direkt

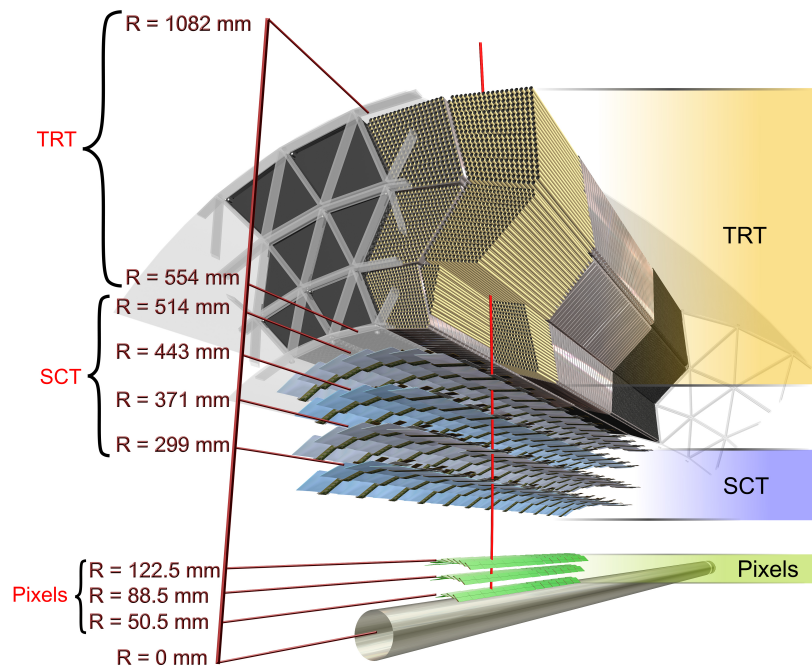


Abbildung 2.3: Darstellung des aktuellen ATLAS Inner Detector, ohne IBL. In rot ist die Flugbahn eines Teilchens durch die diversen Detektoren eingezeichnet, wobei die TRT-Detektoren so angeordnet sind, dass mindestens 36 gasgefüllt Detektorröhren von dem Teilchen passiert werden. [12]

auf dem Strahlrohr befestigt.

Der ID ist essenziell zur Bestimmung der Flugbahn geladener Teilchen, und muss zur Aufrüstung zum HL-LHC im Zuge des ATLAS Phase II Upgrades ersetzt werden, da er den Anforderungen an Ereignisraten und Strahlenhärte nicht mehr entsprechen kann. Weitere Details zu den Hintergründen des Upgrades sind in [11] zu finden.

### 2.2.2 ITk-Detektor

Der neue ITk-Detektor [11] für ATLAS soll vollständig aus Silizium-Halbleiter-Detektoren bestehen, der Aufbau des ITk ist schematisch in Abbildung 2.4 dargestellt. Es ist ein um die Teilchenstrahlachse symmetrischer Schnitt eines Quadranten des Detektordesigns dargestellt. Der ITk-Detektor besteht dabei aus Silizium-Pixel- und Silizium-Streifendetektoren und füllt das gleiche Volumen aus, wie der aktuelle ATLAS ID. Zusätzlich deckt ITk einen größeren Detektionsbereich in Vorwärtsrichtung ab, die maximale Pseudorapidität  $\eta$  wird von rund 2,5 im aktuellen ID auf 4 im ITk erhöht. Die Streifendetektoren sind die äußeren Detektoren, bestehend aus vier zylindrisch um die Strahlachse angeordneten Barrels sowie zwei Endcaps an den beiden Enden der Barrels, welche je aus sechs kreisförmigen Disks zusammengesetzt sind. Die Barrels und Endcaps des ITk-Pixeldetektors sind, wie in Abbildung 2.5 gezeigt, in drei Subsysteme

unterteilt. Das austauschbare Inner System besteht aus den beiden innersten Barrels und einem Endcap, das Outer Endcap setzt sich aus drei einzelnen Endcaps zusammen und das Outer Barrel hat drei Lagen aus Pixeldetektor-Barrels. Die Pixeldetektormodule sind dabei unterschiedlich zur Teilchenstrahlachse ausgerichtet. Eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Eigenschaften der Detektorgruppen ist in [11] zu finden. Die Pixeldetektormodule werden auf sogenannten Local Supports befestigt, ein Karbongerüst, das die nötige Infrastruktur für Stabilität und Kühlung der Detektoren liefert.

Ein Teil dieser Local Supports für das Outer Barrel wird hier an der Universität Bonn mit Pixeldetektormodulen bestückt und in einem finalen Betriebstest für die Verwendung im ITk-Pixeldetektor qualifiziert. Für diese Qualitätskontrollen wird eine CO<sub>2</sub>-Kühlung benötigt, da diese Module im ITk-Detektor in dem ATLAS Experiment mit CO<sub>2</sub> gekühlt werden und Verunreinigungen durch andere Kältemittel in den Leitungen der Local Supports das CO<sub>2</sub>-Kühlsystem am LHC beschädigen könnten [13].

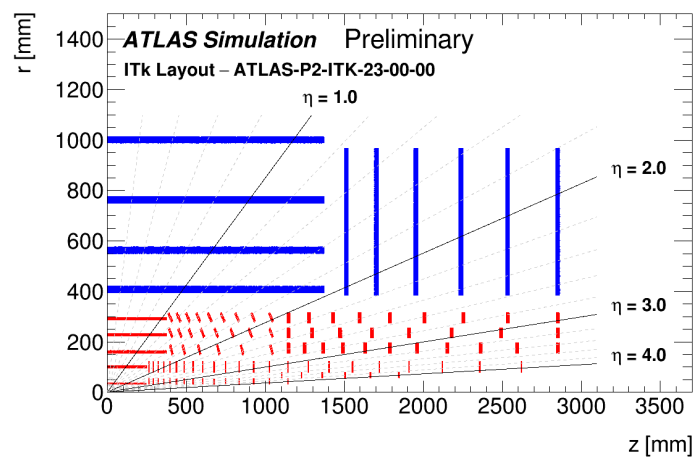


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Schnitts eines Quadranten des ITk-Detektors. In blau sind Streifendetektoren und in rot Pixeldetektoren dargestellt. Die Abszissenachse gleicht der Teilchenstrahlachse, mit dem Kollisionpunkt bei  $z = 0$  mm.  $r$  ist der radiale Abstand zur Strahlachse. [14]

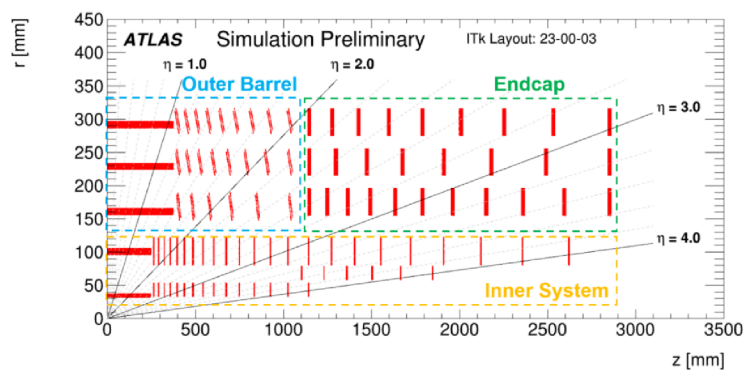


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Schnitts eines Quadranten der ITk-Pixeldetektoren mit Aufteilung in Outer Barrel, Endcap und Inner System. Die Abszissenachse gleicht der Teilchenstrahlachse, mit dem Kollisionpunkt bei  $z = 0$  mm.  $r$  ist der radiale Abstand zur Strahlachse. Bild aus [15] entsprechend den Informationen aus [16], das ursprüngliche Bild ist in [14] zu finden.

---

## Biphasenkühlung und Umsetzung in MARTA

---

Es folgt eine kurze Beschreibung der Funktionsweise und Unterschiede von Einzelphasenkühlung gegenüber Biphasenkühlung. Daraufhin werden die Vorteile von akkumulatorregulierter Biphasenkühlung sowie das Prinzip von I-2PACL geschildert. Für weitere Details wird auf [17] verwiesen, was auch die wesentliche Quelle für die folgenden Informationen ist.

Der neue ITk-Detektor in ATLAS wird, wie der aktuelle IBL-Detektor, mit einem CO<sub>2</sub>-Biphasensystem gekühlt werden. Genauere Details zu den jeweiligen Kühlsystemen sind entsprechend in [17] und [18] zu finden. Für das Kühlsystem des ITk wird CO<sub>2</sub> verwendet, da es unter anderem einen guten Wärmeleitkoeffizient hat, günstig, nicht giftig, nicht brennbar, und umweltfreundlicher als herkömmliche Kältemittel, wie halogenierte Kohlenwasserstoffe, ist. Eine technische Herausforderung ist dabei jedoch, dass für gleiche Temperaturen in Biphasen CO<sub>2</sub> einen viel höherem Druck von 10 – 20 bar benötigt, gegenüber beispielsweise 0,4 – 3 bar von C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>. Ein wesentlicher Vorteil des hohen Evaporationsdrucks ist die Möglichkeit, dünnere Kühlröhrchen zu verwenden, was zu einer Reduzierung des Materials im Detektor führt.

### 3.1 Einzel- und Biphasenkühlung

Das Ziel eines Kühlsystems ist es, eine sich erhaltende Wärmequelle auf ein angemessenes Maß abzukühlen. Dazu wird die Energie aus der Wärmequelle über ein Kältemittel an eine Wärmesenke transportiert. Eine simple Umsetzung davon ist ein Einzelphasenkühlkreislauf, zum Beispiel mit Wasser. Dabei fließt Wasser in Rohrleitungen entlang der Wärmequelle und nimmt Energie in Form von Wärme auf, was zu einer Erhöhung der Enthalpie und Temperatur des Wassers führt. Die Wärmesenke kühlt dann das warme Wasser wieder ab, zum Beispiel durch Temperatenausgleich mit der Umgebung.

Im Falle der Biphasenkühlung hingegen führt eine Erhöhung der Enthalpie des Kältemittels nicht zu einer Temperaturerhöhung, sondern erzeugt einen Phasenübergang im Kältemittel, üblicherweise von flüssiger zu gasförmiger Phase. Das Kältemittel ist dann in Biphasen. In Abbildung 3.1 ist eine Realisierungsmöglichkeit des Biphasenkühlkreislaufes mit einem vereinfachten Druck-Enthalpie-Phasendiagramm unter Ausnutzung der flüssigen und gasförmigen Phase zu sehen. Das gasförmige Kältemittel wird durch einen Kompressor komprimiert und zum Zirkulieren gebracht. Nachdem es dann an einem Kondensator als Wärmesenke kondensiert ist, muss das nun flüssige Kältemittel vor der Wärmequelle an den Sättigungspunkt gebracht werden. Dafür kann ein Druckabfall an einem Ventil

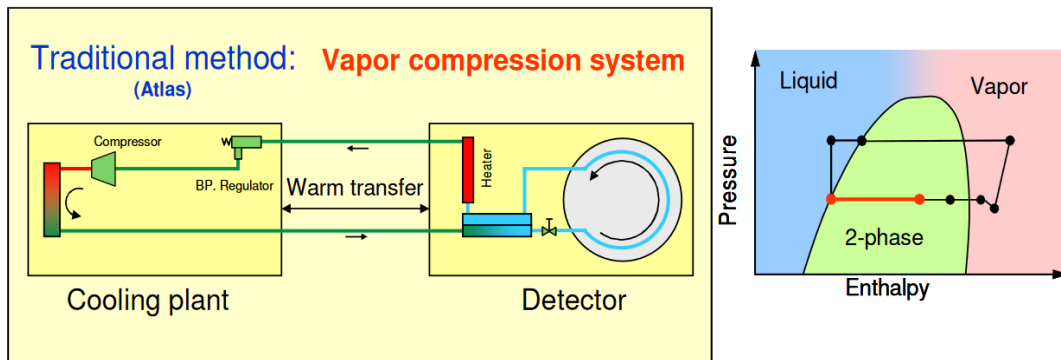


Abbildung 3.1: Links: Skizze des Kühlsystemes für den aktuellen ATLAS ID (ohne IBL) mit  $C_3F_8$  als Kältemittel. Rechts: Druck-Enthalpie-Phasendiagramm für den Kühlkreislauf. Grundlegend ist das Kältemittel am Sättigungspunkt, also kurz vor dem Verdampfen, bevor es in den Detektor fließt. Die Energieabgabe an das Kältemittel im Detektor ist im Phasendiagramm rot dargestellt. Das Kältemittel erwärmt sich dabei nicht, sondern die aufgenommene Energie erzeugt den Phasenübergang zum Gas. Das Heizelement nach dem Detektor (Heater) dient zur vollständigen Evaporation des Kältemittels. [20]

genutzt werden, sodass das Kältemittel sich gerade an der Grenze zum Biphasenzustand befindet. Beim Passieren der Wärmelast führt die Energieaufnahme von der Wärmelast dann zu einem partiellen Phasenübergang, das Kühlmittel ist nun in Biphasen. Die Energieaufnahme an der Wärmequelle ist in dem Phasendiagramm in Abbildung 3.1 rot dargestellt. Nach dem Passieren des Detektors wird das Kältemittel mit einem Heizelement vollständig evaporiert, damit das gasförmige Kältemittel im Kompressor komprimiert werden kann. Somit ergibt sich auch der Vorteil, dass im Zu- und Rückfluss am Detektor das Kältemittel warm ist, wodurch keine Isolation der Leitung notwendig ist. Ein bedeutender Vorteil der Biphasenkühlung für Detektoren ist aber die näherungsweise konstante Kältemitteltemperatur entlang der Wärmequelle, da das Signal-Rausch-Verhältnis, insbesondere bei Halbleiterdetektoren, temperaturabhängig ist [19].

Die übertragene Energie pro Fläche von dem an der Wärmequelle liegendem Kühlleitungsrohr zum Kältemittel wird durch die Wärmestromdichte  $q$  beschrieben. Allgemein ist  $q$  direkt von der Temperaturdifferenz zwischen Rohrwandtemperatur  $T_w$  und Kältemitteltemperatur  $T$  abhängig, gemäß [17]

$$q = h \cdot (T_w - T), \quad (3.1)$$

mit dem Wärmeübertragungskoeffizienten  $h$ . Demnach ist  $h$  eine Beschreibung für die Effizienz des Kühlsystems. Zusätzlich ist für Biphasenkühlung  $q$  noch local durch Faktoren wie dem Massenverhältnis von Gas zu Flüssigkeit (vapor-quality), der Flussgeschwindigkeit des Kältemittels oder der Rohrbeschaffenheit bestimmt. Für eine ausführliche Diskussion dieser Faktoren wird auf [17] verwiesen. Ein Risiko der Biphasenkühlung besteht jedoch darin, dass nach einem vollständigen Phasenübergang sich das gasförmige Kältemittel aufheizt und die Wärmeübertragung abnimmt. Dies wird als dry-out bezeichnet, da dann kein flüssiges Kältemittel mehr vorliegt.

### 3.2 Biphasenkühlung mit Akkumulator

Eine Weiterentwicklung des konventionellen Biphasenkühlsystems ist das 2PACL<sup>1</sup> Konzept, welches unter anderem am IBL und LHCb-VELO-Detektor zum Einsatz kommt. Dabei wird ein Akkumulator zur Regulierung der Kältemitteltemperatur verwendet. In Abbildung 3.2 ist der schematische Aufbau sowie das Phasendiagramm für das 2PACL-Kühlsystem des IBL skizziert. Gegenüber dem beschriebenen kompressorbasierten Biphasenkühlsystem ist der Kompressor durch eine Pumpe ersetzt und die Kondensation des Kältemittels findet im Kondensator durch Kühlung mit einem zusätzlichen, primären Kühlkreislauf statt. Dies vereinfacht die Wartung des Kühlsystems, da für den sekundären CO<sub>2</sub>-Kühlkreislauf dann kein wartungsintensiver, ölfreier Kompressor benötigt wird.

Der Kühlkreislauf in Abbildung 3.2 beginnt o. B. d. A. bei Punkt 1 mit dem am Kondensator heruntergekühltem, flüssigen CO<sub>2</sub>. Die Pumpe bringt nun das CO<sub>2</sub> zum Zirkulieren, und sorgt für eine Druckerhöhung sowie eine leichte Enthalpieerhöhung im CO<sub>2</sub>. Mit einem Heizelement, dem Pre-Heater, wird nun das Kältemittel näher an den Sättigungspunkt gebracht. Von Punkt 3a zu 3b passiert das CO<sub>2</sub> die innere Leitung einer mit dem CO<sub>2</sub>-Rückfluss aus dem Detektor koaxialen Transfer Line, und es wird

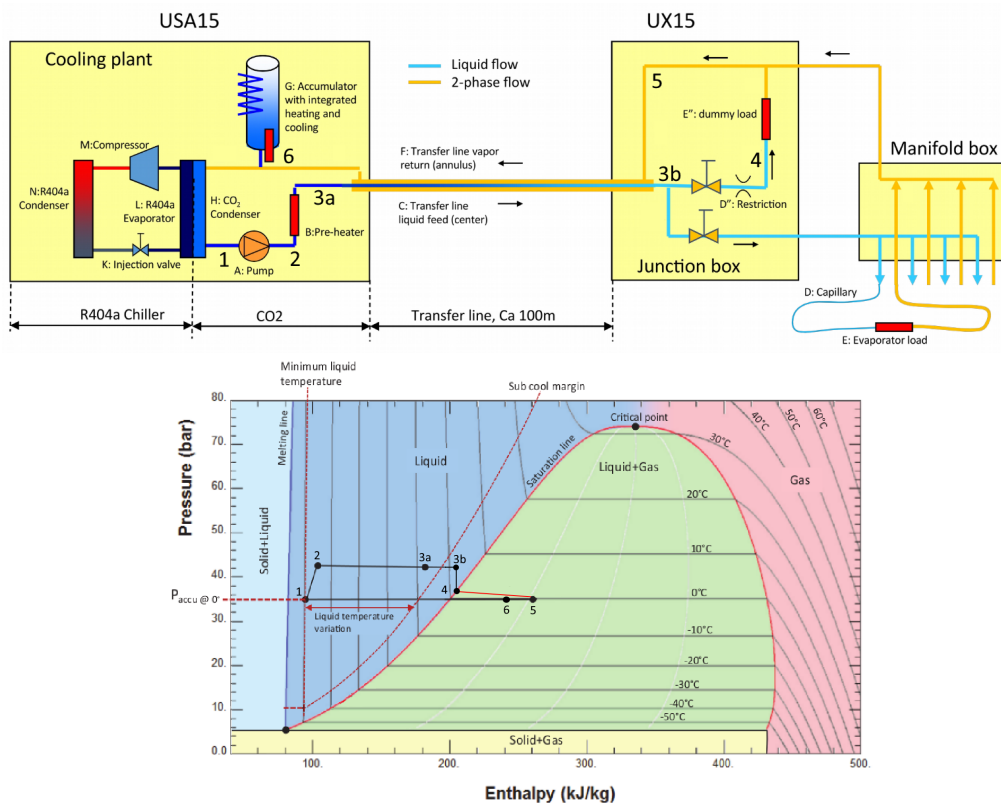


Abbildung 3.2: Oben: Skizze des Kühlsystems mit Dummy Load für den IBL-Detektor und CO<sub>2</sub> als Kältemittel. Unten: Druck-Enthalpie-Phasendiagramm mit eingezeichneten Isothermen für den sekundären CO<sub>2</sub> Kühlkreislauf. Die Temperatur im Detektor kann mit dem Akkumulator reguliert werden und es bedarf keiner aktiven Elemente im Detektor. Bilder modifiziert aus [18] (oben) und [17] (unten).

<sup>1</sup>engl. 2-Phase Accumulator Controlled Loop

zwischen Zu- und Abfluss Enthalpie ausgetauscht. Dies bringt das in den Detektor strömende CO<sub>2</sub> weiter an den Sättigungspunkt und senkt gleichzeitig die Enthalpie des zurückfließenden CO<sub>2</sub>. Nun passiert das Kältemittel den Detektor und der Druck sinkt entlang der Kühlleitung, damit ist die Temperatur des CO<sub>2</sub> entlang des Detektors nicht ganz konstant, wie an den Isothermen im Phasendiagramm sichtbar ist. Dieser Druckabfall kann entsprechend der Einstellung des Ventils zwischen Punkt 3b und 4 aber variiert werden. Wird der Druckabfall über das Ventil verringert, reduziert sich die Temperatur des Kältemittels in Punkt 4, jedoch ist dann der Druck- und Temperaturabfall entlang des Detektor größer. Andersherum sorgt eine Vergrößerung des Druckabfalls über das Ventil für eine höhere Temperatur im Detektor, aber einen geringeren Temperaturgradienten entlang der Kühlleitung im Detektor [21]. Nach dem Detektor wird erst von Punkt 5 nach 6 die Enthalpie des CO<sub>2</sub> durch die koaxiale Transfer Line gesenkt und letztlich gelangt das CO<sub>2</sub> durch Kondensation am gekühlten Kondensator wieder zu Punkt 1.

Der wesentliche Vorteil des 2PACL Kühlsystems liegt aber im Akkumulator. Mit dem Akkumulator kann die Temperatur des Kältemittels im Detektor ferngesteuert werden und es bedarf keiner aktiven Elemente im Detektor. Wichtig für das Funktionsprinzip des Akkumulators ist, dass in Biphasen ein konstanter Druck des Kältemittels auch einer konstanten Temperatur gleicht. Genauso bedeutet eine Druckänderung eine entsprechende Temperaturänderung, welche an den eingezeichneten Isothermen im Phasendiagramm in Abbildung 3.2 ablesbar ist. Da zwischen dem Rückfluss des Detektors und dem Akkumulator durch recht große Rohrleitungen keine wesentliche Druckdifferenz herrscht, ist der Druck und damit die Temperatur des Kältemittels im Akkumulator näherungsweise gleich der Temperatur des Kältemittels im Detektor, solange das Kältemittel noch in Biphasen ist. Es kann also einfach die Temperatur im Akkumulator durch externe Kühl- und Heizelemente reguliert werden, was dann direkt der Temperatur im Detektor entspricht. Konstruktionsbedingt kann das Kältemittel im Akkumulator nie vollständig verdampfen, liegt also im laufenden Betrieb immer in Biphasen vor. Ein Nachteil des Kühlsystemes mit Akkumulator ist jedoch, dass das Kältemittel in der Transfer Line kalt ist und diese entsprechend thermisch isoliert werden muss.

### 3.3 I-2PACL in MARTA

Im CO<sub>2</sub>-Kühlsystem MARTA wird das I-2PACL<sup>2</sup> Prinzip verwendet, welches eine Erweiterung des 2PACL Konzepts darstellt. Beim I-2PACL ist die Temperaturregelung des Akkumulators im System integriert. Eine Skizze des I-2PACL-Kühlsystemes ist in Abbildung 3.3 zu sehen, das Kältemittel ist CO<sub>2</sub>. Der Akkumulator wird durch das am Chiller gekühlte CO<sub>2</sub> gekühlt, sodass die minimal mögliche Akkumulatortemperatur gleich der minimalen Chillertemperatur ist. Dieses Konzept ist dem 2PACL sehr ähnlich, jedoch simpler in Konzeption und Umsetzung sowie kostengünstiger. Nachteilig hingegen sind eine reduzierte Kühlleistung und Effizienz gegenüber einer externen Akkumulatorkühlung [22].

Übersteigt die zu kühlende Leistung die Kapazität des I-2PACL Systems führt dies nicht mehr zu einem dry-out, sondern zu einer erhöhten Temperatur im Akkumulator [24]. Dies führt zu einer höheren Temperatur des Kältemittels im Experiment und damit nach Gleichung (3.1) zu einer geringeren Energieaufnahme, bis sich ein neues, stabiles Gleichgewicht einstellt. Zwar steigt dadurch die CO<sub>2</sub> Temperatur und damit die Temperatur des Experimentes, jedoch wird eine gleichmäßige Kühlung ohne dry-out entlang der Kühlleitung gewährleistet. Dieses Phänomen wird im Folgenden als heat-up bezeichnet. Liegt kein heat-up vor, so arbeitet das System in einem stabilen Kühlbereich.

---

<sup>2</sup>engl. *Integrated 2-Phase Accumulator Controlled Loop*

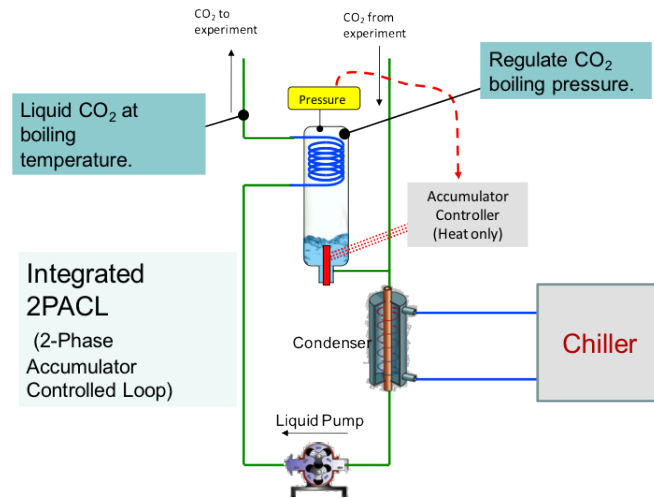


Abbildung 3.3: Skizze eines CO<sub>2</sub> I-2PACL-Kühlsystems, wie es in MARTA verwendet wird. Der Akkumulator wird hier nicht extern, sondern von dem vom Chiller gekühlten CO<sub>2</sub> gekühlt. [23]

An MARTA lässt sich die gewünschte Akkumulatortemperatur als Setpointtemperatur  $T_{\text{set}}$  einstellen. Die tatsächliche Temperatur im Akkumulator, berechnet aus dem gemessenen Druck im Akkumulator, wird als Feedbacktemperatur  $T_{\text{fbk}}$  bezeichnet. Im normalen Betrieb wird der Druck im Akkumulator so geregelt, dass  $T_{\text{fbk}} = T_{\text{set}}$ . Falls jedoch die maximale Heizlast, die von MARTA gekühlt werden kann, überschritten wird, dann liegt ein heat-up vor und  $T_{\text{fbk}}$  steigt an. Außerhalb der maximalen Kühlleistung kann also  $T_{\text{fbk}}$  nicht mehr auf  $T_{\text{set}}$  herunter geregelt werden.

Die in [25] vorgestellte maximale Kühlleistung des MARTA Prototypen ist in Abbildung 3.4 gezeigt. Dabei ist jedoch nicht klar gekennzeichnet, ob das Plateau bei knapp 650 W durch die Kühlleistung des MARTA Prototypen begrenzt ist oder einfach die maximale Heizlast erreicht wurde.

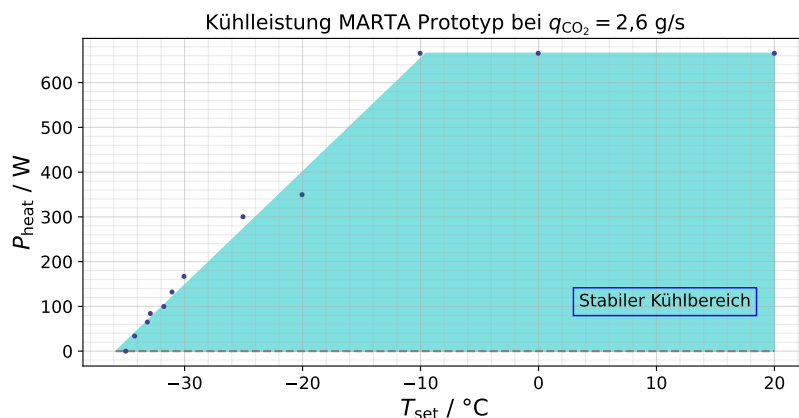


Abbildung 3.4: Stabiler Kühlbereich des MARTA Prototypen bei einer CO<sub>2</sub>-Flussrate  $q_{\text{CO}_2} = 2,6 \text{ g s}^{-1}$ . Es sind Datenpunkte für die maximal stabil kühlbare Heizlast  $P_{\text{heat}}$  gegen die Setpointtemperatur  $T_{\text{set}}$  aufgetragen. Die Daten sind aus [25], digitalisiert mit [26].

---

## Versuchsaufbau und Komponenten

---

Zur Charakterisierung der maximalen Kühlleistung von MARTA wird untersucht wann ein heat-up auftritt. Ursprünglich sollte dazu die Temperatur an jedem Widerstandsblock bei unterschiedlichen Heizlasten  $P_{\text{heat}}$  betrachtet werden und ein starker Temperaturanstieg bei einem heat-up beobachtet werden. Die Optimierung der Installation der Temperatursensoren ist deswegen ein wesentlicher Bestandteil der durchgeführten Arbeit. Da aber die Feststellung eines heat-up durch Anstieg von  $T_{\text{fbk}}$  verlässlicher ist, erfolgt die Charakterisierung dadurch.

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau sowie die einzelnen Komponenten beschrieben. Vor allem wird die Inbetriebnahme von MARTA geschildert und die Temperaturmessung an den Widerstandsblöcken diskutiert.

### 4.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau besteht im Wesentlichen aus dem CO<sub>2</sub>-Kühlsystem MARTA und der daran angeschlossenen Local Box mit zu kühlendem Experiment, bestehend aus drei Heizblöcken, bestückt mit jeweils zwei Lastwiderständen. Zusätzlich wird an den Blöcken die Temperatur dieser gemessen. MARTA besitzt dafür zwei Temperaturfühler, diese sind aktuell jedoch defekt. Daher werden externe Temperatursensoren verwendet, deren Datenerfassung mit Mikrocontrollern und einem Rechner erfolgt. Ebenso werden Daten aus MARTA, wie die berechnete CO<sub>2</sub> Temperatur im Akkumulator, mittels TCP/IP auf dem Rechner gesammelt. Ein Foto des gesamten Aufbaus ist in [Abbildung 4.1](#) zu finden und in [Abbildung 4.2](#) schematisch skizziert.

Die CO<sub>2</sub>-Transfer-Line von MARTA zur Local Box ist  $(2,0 \pm 0,1)$  m lang und flexibel. Die Local Box besteht, wie in [Abbildung 4.3](#) zu sehen ist, aus einem symmetrischen doppelt J-förmigem Swagelok Rohrleitungssystem mit Ventilen für den CO<sub>2</sub> Zu- und Abfluss, wobei am Zufluss ein fein einstellbares Ventil MV5 vorliegt. Zusätzlich gibt es weitere Leitungen und Ventile zum Befüllen des Experiments, sowie eine Berstscheibe, um das System vor Überdruck zu schützen. Auf der Berstscheibe ist der kritische Druck als  $(131 \pm 7)$  bar bei 22 °C aufgedruckt. Das CO<sub>2</sub> fließt nach den Ventilen  $(20 \pm 1)$  cm gerade und dann  $(17 \pm 1)$  cm diagonal hoch um in einer  $(30 \pm 5)$  cm langen Rohrverteilung entgegen der Zuflussrichtung zu enden. Dann fließt das CO<sub>2</sub> durch ein  $(1,0 \pm 0,1)$  m langes und  $(6 \pm 2)$  mm dickes Rohr, an dem die Lastwiderstände angebracht sind. Das Rohr hat eine C-Form, wobei es beidseitig  $(10 \pm 1)$  cm vom Rohrverteiler absteht, dann beidseitig  $(15 \pm 1)$  cm in die Höhe geht und sich letztlich



Abbildung 4.1: Der gesamte Versuchsaufbau. Rechts außerhalb des Bildes ist der Rechner zur Datenerfassung. Auf MARTA steht die Local Box mit den Lastwiderständen sowie die Netzteile. Die Mikrocontroller zur Datenerfassung der Temperatursensoren liegen auf den Netzteilen.

in einer  $(55 \pm 1)$  cm langen Gerade schließt. Das Rohr mit den Lastwiderständen sowie ein Teil des Rohrverteilers sind nicht thermisch isoliert. Die sechs Widerstände haben jeweils eine Nennleistung von 100 W, also steht insgesamt eine Heizlast von 600 W zur Verfügung.

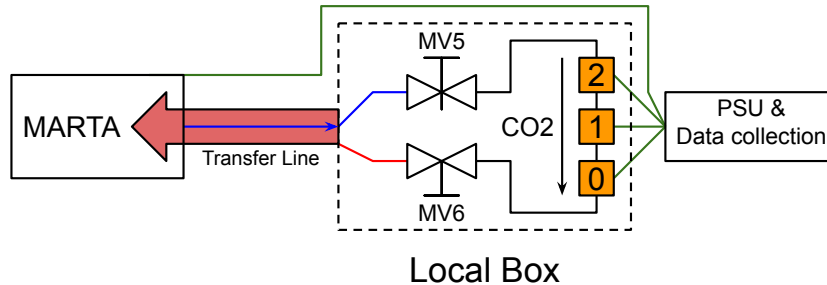


Abbildung 4.2: Skizze des Versuchsaufbaus mit MARTA, Local Box und Stromversorgung (PSU), sowie Datenauslese. Flüssiges  $\text{CO}_2$  aus MARTA gelangt über die innere Leitung der koaxialen Transfer Line zu der Local Box und kühlt die Widerstandsblöcke. Diese Blöcke und die Temperatursensoren an den Blöcken sind entgegen der  $\text{CO}_2$ -Flussrichtung nummeriert.  $\text{CO}_2$  in Biphase verlässt die Local Box durch MV6 und folgt der Transfer Line zurück zu MARTA. Das Zuflussventil MV5 vor dem Experiment ist ein fein einstellbares Dosierventil.

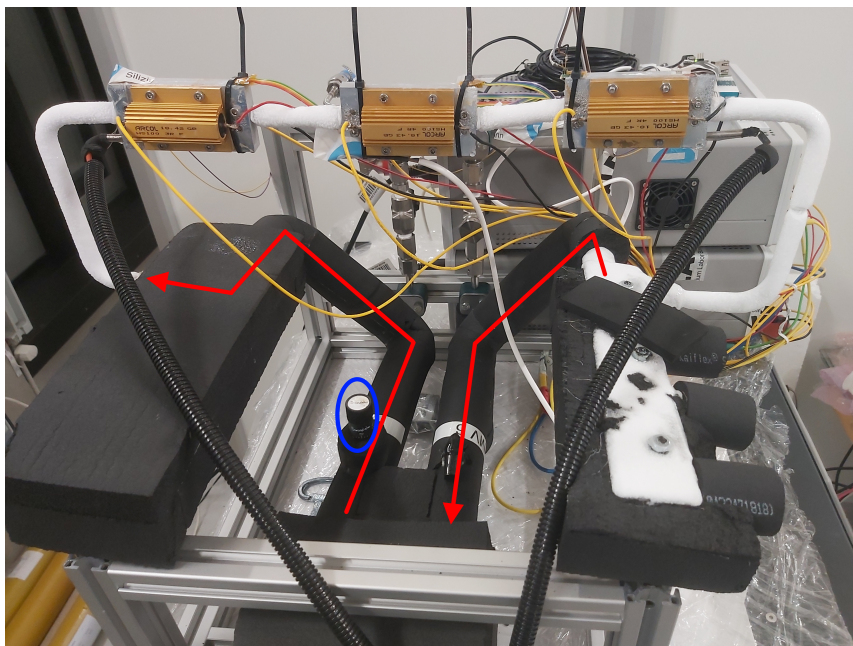


Abbildung 4.3: Die Local Box mit der im laufenden Betrieb von MARTA in Eis bedeckten  $\text{CO}_2$ -Kühlleitung sowie die von Eis freien heizenden Lastwiderstände. In rot ist die  $\text{CO}_2$ -Flussrichtung eingezeichnet und in blau ist das Ventil MV5 gekennzeichnet.

Alle Längen wurden mittels eines Gliedermaßstabs bestimmt, der geschätzte Fehler beruht auf der Ablesegenauigkeit und -parallaxe.

## 4.2 Komponenten des Aufbaus

Im Folgenden werden die Eigenschaften der einzelnen Komponenten des Aufbaus detailliert beschrieben.

### 4.2.1 MARTA

MARTA ist ein wie in Kapitel 3.3 beschriebenes I-2PACL CO<sub>2</sub>-Kühlsystem mit einem primären R507 Kompressor Kühlkreislauf. Die wichtigen Parameter des Betriebes sind die Setpointtemperatur  $T_{\text{set}}$ , der Druckabfall über der CO<sub>2</sub>-Pumpe  $dP_{\text{pump}}$ , die CO<sub>2</sub>-Flussrate  $q_{\text{CO}_2}$  sowie die Drehzahl der Pumpe  $f_{\text{pump}}$ . Es lässt sich entweder ein festes  $q_{\text{CO}_2}$  (automatic mode) oder  $f_{\text{pump}}$  (manual mode) einstellen, diese beiden Parameter sind nicht gleichzeitig einstellbar. Die Kühlleistung von MARTA folgt dann aus den eingestellten Betriebsparametern.

#### Arbeitsbereich

Es liegt eine Anleitung [24] vor, welche als Richtlinie zur Bedienung dient. Laut Anleitung soll das CO<sub>2</sub>-Kühlsystem unter den in Tabelle 4.1 genannten Randbedingungen laufen.  $T_{\text{room}}$  ist hierbei die Raumtemperatur und sollte für optimale Kühlleistung unter 22 °C liegen.

Parameter	Maximaler Wertebereich laut Anleitung		Sicherer Bereich
$T_{\text{set}}$	$[-40\text{ °C}, T_{\text{room}}]$	mit $15\text{ °C} < T_{\text{room}} < 25\text{ °C}$	$[-30\text{ °C}, 20\text{ °C}]$
$q_{\text{CO}_2}$	$[1\text{ g s}^{-1}, 4\text{ g s}^{-1}]$	bzw. $f_{\text{pump}} \in [2\text{ kRMP}, 6\text{ kRPM}]$	$[2\text{ kRMP}, 5\text{ kRPM}]$
$dP_{\text{pump}}$	$[1\text{ bar}; 6\text{ bar}]$		$[1,2\text{ bar}; 5,5\text{ bar}]$

Tabelle 4.1: Maximale und sichere Bereiche der Betriebsparameter von MARTA

Der sichere Bereich ist hierbei der Bereich, in dem stabile Kühlleistung gewährleistet wird. Laut Anleitung liegt die Kühlleistung bei  $T_{\text{set}} = -30\text{ °C}$  zwischen 250 – 300 W. Diese Betriebsparameter lassen sich an MARTA in den folgenden Wertebereichen direkt einstellen:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{set}} &\in [-35\text{ °C}, 25\text{ °C}], \\
 q_{\text{CO}_2} &\in [1\text{ g s}^{-1}, 6\text{ g s}^{-1}], \\
 f_{\text{pump}} &\in [2\text{ kRMP}, 6\text{ kRPM}].
 \end{aligned}$$

Hierbei ist der Pumpdruck  $dP_{\text{pump}}$  nicht direkt einstellbar, sondern ergibt sich aus der Stellung des Ventils MV5 und  $f_{\text{pump}}$ . Das System regelt jedoch ab  $dP_{\text{pump}} > 5\text{ bar}$  den Pumpdruck über Öffnen eines internen Umgehungsventils EV3, welches vor MV5 zwischen Zu- und Abfluss des Experiments liegt, wieder runter und schaltet sich bei  $dP_{\text{pump}} < 1\text{ bar}$  ab. Es ist auch darauf zu achten, dass mit erhöhter Kühllast der Pumpdruck steigt und stark schwanken kann. Daher hat sich ein maximales  $dP_{\text{pump}} \leq 4,5\text{ bar}$  als stabil im Betrieb erwiesen, damit selbst mit diesen Schwankungen der Pumpdruck nicht 5 bar überschreitet.

Die maximale CO<sub>2</sub>-Flussrate nimmt mit sinkendem  $T_{\text{set}}$  und steigender Heizlast ab. Da im sicheren Bereich für  $f_{\text{pump}}$  keine stabile Flussrate von  $q_{\text{CO}_2} = 4\text{ g s}^{-1}$  bei  $T_{\text{set}} = -30\text{ °C}$  und 600 W Heizlast gehalten werden konnte, wird zunächst mit einer maximalen Flussrate von  $q_{\text{CO}_2} = 3\text{ g s}^{-1}$  gearbeitet.

Es ist zu erwarten, dass mit erhöhter Flussrate eine Erhöhung der maximalen Kühlleistung folgt, da ein größerer Massenstrom an  $\text{CO}_2$  mehr Enthalpie aufnehmen kann, bevor ein heat-up eintritt. Dabei wird mit steigendem  $f_{\text{pump}}$  jedoch der Verschleiß der Pumpe erhöht. Die maximale Flussrate lässt sich möglicherweise durch ein größeres Füllgewicht von  $\text{CO}_2$  erhöhen.

### Inbetriebnahme

Nach Wartungen oder Wechsel des Experiments muss MARTA oder das Experiment mit  $\text{CO}_2$  befüllt werden. Der Vorgang ist in [24] beschrieben. Der allgemeine Ablauf der Befüllung ist:

1. Schutzbrille und -handschuhe tragen. Sicherstellen, dass alle Ventile nach außen geschlossen sind.
2. Eine Steigrohrflasche mit flüssigem  $\text{CO}_2$  auf eine Waage stellen und an ein offenes Ventil des Systems anschließen. Das Ventil der Flasche bleibt zu.
3. Über ein Ventil mit einer Vakuumpumpe ein Vakuum von rund 3 mbar in dem System erzeugen und das Ventil wieder schließen.
4. Das Ventil der  $\text{CO}_2$ -Flasche öffnen und das System mit  $\text{CO}_2$  füllen, die genaue Menge hängt von dem Volumen des Systems ab. MARTA selbst ist mit rund 1,3 kg  $\text{CO}_2$  zu befüllen.
5. Das Ventil an dem die Flasche angeschlossen ist sowie das Ventil an der Flasche schließen. Flasche und Vakuumpumpe vom System trennen.

MARTA und die Local Box wurden erfolgreich unter einem Vakuum von  $(0,2 \pm 0,1)$  bar mit ca. 1,5 kg  $\text{CO}_2$  befüllt, bis der Druck in der Flasche dem Druck in MARTA glich. Der Einschaltvorgang von MARTA ist ebenfalls in [24] beschrieben. Die wesentlichen Abläufe sind:

1. Stromversorgung für MARTA sicherstellen und Hauptschalter umlegen.
2. Überprüfen, dass alle  $\text{CO}_2$ -Sensoren ähnliche Werte haben und ggf. Alarmer zurücksetzen.
3. Chiller und  $\text{CO}_2$  starten, Betriebsparameter einstellen. Währenddessen MV5 öffnen, sodass  $dP_{\text{pump}}$  im sicheren Bereich liegt.
4. Zu kühlendes Experiment erst starten, sobald die Feedbacktemperatur  $T_{\text{set}}$  erreicht hat.

Die Einstellung von MV5 beim Starten der Kühlung ist kritisch für den Startvorgang. Ab dem Start der  $\text{CO}_2$ -Pumpe gibt es nur ein Zeitfenster von rund einer Minute in dem  $dP_{\text{pump}}$  auf mindestens 1 bar steigen muss. Ist das Ventil zu offen, schaltet sich MARTA ab, da  $dP_{\text{pump}}$  zu klein ist. Ist das Ventil jedoch zu geschlossen und  $dP_{\text{pump}}$  liegt zu hoch, schaltet sich MARTA ebenfalls ab. Daher sollte beim Starten der Kühlung  $dP_{\text{pump}}$  genau beobachtet werden, um das Ventil dementsprechend passend einzustellen. Es hat sich als sinnvoll erwiesen beim Start MV5 auf rund 1–1,5 Umdrehungen zu öffnen.

### 4.2.2 Widerstände und Netzteile

Die zu kühlende Heizlast besteht aus sechs Widerständen, mit drei mal  $3 \Omega$  und drei mal  $4 \Omega$ , welche in entsprechenden Zweierpaaren entlang der  $\text{CO}_2$  Leitung auf  $(10,0 \pm 0,1)$  cm langen Aluminiumblöcken angebracht sind. Die Blöcke haben zueinander einen Abstand von  $(6 \pm 1)$  cm, können jedoch auch etwas

auf dem Rohr verschoben werden. Die Widerstände sind ARCOL HS100 RX F [27], wobei das X für den Widerstand  $R$  in Ohm steht, und haben laut Hersteller einen Fehler von 1 % auf den Nennwiderstand. Die maximale umgesetzte Leistung in einem Widerstand soll 100 W und die maximale Temperatur 200 °C nicht überschreiten. Die Lastwiderstände werden bei einem konstanten Strom  $I$  mit der Leistung  $P$  entsprechend  $I = \sqrt{P/R}$  betrieben. Damit ist sichergestellt, dass unabhängig von dem Widerstand der Kabel zum Netzteil, die Wärmeleistung am Lastwiderstand konstant ist.

Die Widerstände werden mit zwei ROHDE&SCHWARZ HMP4040 Netzteilen [28] betrieben, im folgenden HMP genannt. Die HMP werden mit dem Rechner gesteuert und haben eine maximale Leistung von 384 W, welche auf vier Kanäle mit maximal 160 W pro Kanal verteilt werden kann. Je Kanal beträgt die maximale Spannung 32 V und der maximale Strom 10 A. Alle Widerstände werden aus je einem Kanal der zwei HMP betrieben, sodass die maximalen 600 W Heizleistung erreicht werden können. Die HMP können auf rund 0,1 % genau eingestellt werden, was gegenüber dem Fehler des Lastwiderstandes vernachlässigt wird. Damit folgt für die Heizlast ein Fehler von 1 %.

### 4.2.3 Temperatursensoren

Zunächst wurden für die Temperaturmessung einfach NTCs<sup>1</sup> mit Wärmeleitpaste und Klebeband an die drei Widerstandsblöcke angeklebt und mit Hilfe eines Arduino Nano [29] der Widerstand  $R$  der NTCs berechnet. Dazu wird mit dem NTC und einem 10 kΩ Widerstand ein Spannungsteiler konstruiert, der Spannungsabfall über den NTC gemessen und mit Hilfe der Gesamtspannung  $U_G$  wird  $R$  berechnet. Dabei werden für jeden Messpunkt fünf Spannungswerte gemessen, aus denen dann der Mittelwert gebildet wird. Durch eine Vereinfachung der Steinhart-Hart-Gleichung kann dann die Temperatur  $T$  des NTCs in Kelvin mit

$$T(R) = \left( \frac{1}{T_{\text{nom}}} + \frac{1}{\beta} \cdot \ln(R/R_{\text{nom}}) \right)^{-1} \quad (4.1)$$

näherungsweise berechnet werden. Hierbei sind  $\beta$ ,  $T_{\text{nom}}$  und  $R_{\text{nom}}$  Eigenschaften des NTC und können dem Datenblatt [30] entnommen werden. Laut Datenblatt hat  $\beta_{25/100} = 4300$  K einen Fehler von 3 % und  $R_{\text{nom}} = 10$  kΩ einen Fehler von 10 %. Der Fehler des für den Spannungsteiler verwendeten Widerstandes wird angesichts des Fehlers von  $R_{\text{nom}}$  im Folgenden vernachlässigt. Noch dazu hat der vom Arduino verwendete Prozessor, ein ATmega328 [31], einen Analog-Digital-Umsetzer (ADC) mit einer 10-Bit Auflösung. Das heißt, die Messauflösung des ADC ist zwischen 0 V und  $U_G$  auf 1024 Stufen begrenzt, was die Messgenauigkeit von  $R$  begrenzt. Durch die Mittelung von fünf Messwerten wird dieser Fehler aber reduziert. Für die Abschätzung des Messfehlers wird ein Rauschen der Spannung sowie eine Nichtlinearität des ADCs vernachlässigt. Der sich nur aus Gleichung (4.1) ergebende Messfehler des NTC, sowie der Gesamtfehler der NTC Temperaturmessung mit der ADC Auflösung ist in Abbildung 4.4 aufgetragen. Der Gesamtmessfehler mit Mittlung der Messwerte hat ein Minimum von rund 1,7 °C bei einer NTC Temperatur von -25,2 °C. Wegen des Messfehlers und der limitierten Wärmeübertragung vom Widerstandsblock zum NTC, aufgrund der runden Form der NTCs, wird eine starke Abweichung zwischen der mit den NTCs gemessenen Temperatur und der tatsächlichen Temperatur der Widerstandsblöcke erwartet. Daher wurde eine Kalibrierung der NTCs vorgenommen.

Dazu wurden an MARTA und den Lastwiderständen unterschiedliche Parameter eingestellt, um damit diverse Temperaturen zu erzeugen, sodass dann die Werte der NTCs mit den manuell gemessenen Daten eines Infrarotthermometers (IR) überprüft werden können. Ursprünglich wurde zur Überprüfung ein

<sup>1</sup>engl. *Negative Temperature Coefficient thermistor*

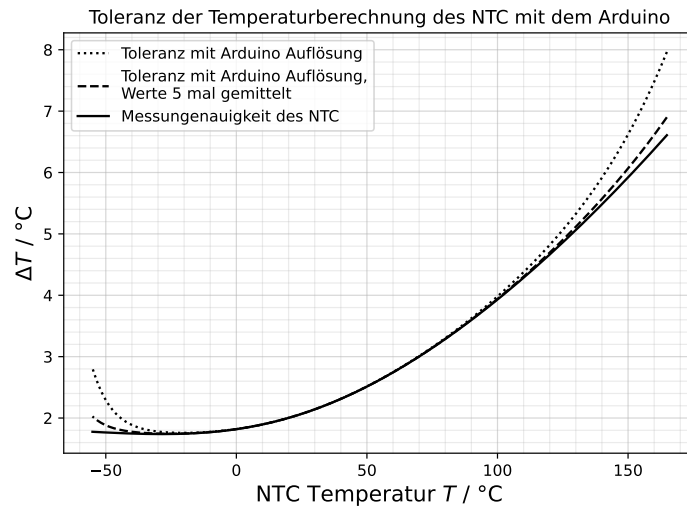


Abbildung 4.4: Berechnete Messungenauigkeit der Temperaturmessung des NTC ( $\Delta T$ ) in Abhängigkeit der Temperatur. Es ist die einfache Messungenauigkeit des NTC nach Gleichung 4.1 aufgetragen. Noch dazu ist auch die Messtoleranz der Temperaturmessung unter Beachtung der ADC Auflösung eingezeichnet, mit und ohne Mittlung der ADC Messwerte. Es ist zu sehen, dass somit die gesamte Messungenauigkeit für große und kleine Temperaturen des NTC, aufgrund des verwendeten Spannungsteilers, steigt. Die Berechnung der Messfehler folgt aus Gaußscher Fehlerfortpflanzung mit dem python Paket uncertainties [32].

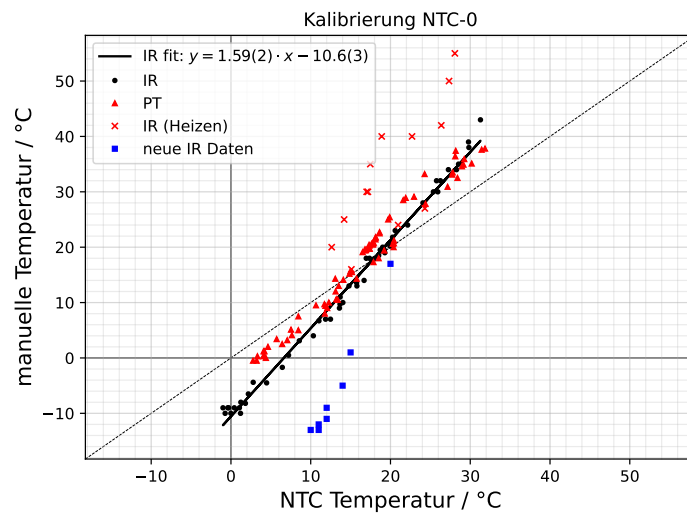


Abbildung 4.5: Kalibrierung des NTC-0, es ist die mit dem IR und PT manuell gemessene Temperatur der Widerstandsblöcke gegen die mit dem NTC gemessene Temperatur aufgetragen. Es fällt auf wie die neuen IR Daten nicht mehr zu der alten Kalibrierung passen. Die Anpassungsgerade wurde nur für die schwarz eingezeichneten IR-Daten durchgeführt, also ausgenommen sind rot markierte PT-Daten sowie IR-Daten beim Aufheizen der Widerstände. Die Fehler sind zur Übersicht nicht eingezeichnet. Die Kalibrierungen aller NTCs sind im [Anhang](#) in Abbildung A.1 zu finden.

System aus Platin-Messwiderstand (PT) und automatischer Temperaturberechnung verwendet, was sich jedoch als äußerst unpraktisch erwiesen hat, da nur ein PT-Sensor für drei Widerstandsblöcke zur Verfügung stand. Der Fehler der manuellen Temperaturmessung mit dem IR und PT wird auf 1 °C geschätzt. Eine besondere Herausforderung der Messung mit dem IR war die Reflektivität des Aluminiums der Widerstandsblöcke, wodurch nicht direkt auf dem Aluminium, welches das CO<sub>2</sub>-Rohr umschließt, sondern nur an den lackierten Kühlkörpern der Widerstände selber die Temperatur zuverlässig bestimmt werden konnte (vgl. Abb. 4.3). Da jedoch beim aktiven Heizen mit den Widerständen die Widerstände gegenüber dem Aluminiumblock eine Temperaturdifferenz von bis zu 5 °C hatten, sind jene IR-Werte während des Heizens mit den Widerständen gesondert zu betrachten. Allgemein ist dennoch die IR-Temperatur an den Widerständen höher als die Temperatur der Aluminiumblöcke. Die Kalibrierung zeigte vielversprechende Ergebnisse mit einem linearen Zusammenhang zwischen der mit dem NTC und dem IR gemessenen Temperatur. Leider war dieses Verhalten jedoch nicht stabil, da nach rund zwei Wochen eine kurze Überprüfung der Kalibrierung teils Ergebnisse mit einer Abweichung von mehr als 10 °C geliefert hat, wie in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Der thermische Kontakt zwischen Aluminiumblock und NTC hat sich also als unzuverlässig erwiesen, Ursache dafür könnten leichte mechanische sowie thermische Belastungen sein.

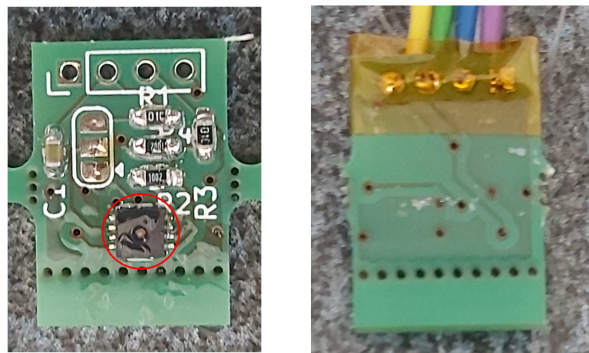


Abbildung 4.6: Links: Der SHT-Sensor, in rot markiert, auf der Leiterplatine, welche grob 1 cm<sup>2</sup> groß ist. Es sind gut die offenen Lötstellen zu erkennen, die durch Kondenswasser kurzgeschlossen werden können. Rechts: Die Rückseite der Leiterplatine mit abgeklebten Kontakten.

Daraufhin wurden zusätzliche SHT-35 Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren [33] angeschafft, welche über I2C mittels einem ESP8266-Mikrocontroller (ESP) ausgelesen werden. Diese SHT-Sensoren wurden, wie in Abbildung 4.6 zu sehen ist, auf Leiterplatten gelötet. Die Leiterplatten wurden dann mit Wärmeleitpaste auf deren flachen Unterseite an den Widerstandsblöcken befestigt. Die SHTs sind von Werk aus kalibriert und die Messgenauigkeit laut Datenblatt ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Im Folgenden wird eine Messgenauigkeit der SHT Temperaturmessung von 0,2 °C angenommen. Da damit nun die Leiterplatine direkt auf dem elektrisch leitenden Aluminiumblock liegt sind die SHTs und ESPs im Messbetrieb jedoch wesentlich empfindlicher als die NTCs und der Arduino. Zum einen kann durch die aktive Kühlung entstehendes Kondenswasser zu einem Fehler bei der Auslese des SHT führen, und zum anderen kann ein Kurzschluss der Datentransfer- und Spannungsleitungen zwischen SHT und ESP zu einem Defekt des ESP führen. Um beide Probleme auszuschließen wurden die Leitungen der Leiterplatten auf denen sich die SHTs befinden ausreichend mit Kleber, Klebeband und Knetmasse abgedeckt. Eine Überprüfung der Kalibrierung der SHT-Sensoren ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Es fällt auf, dass die Temperatur der SHT-Sensoren, im Gegensatz zu den NTC-Sensoren, gut der mit dem

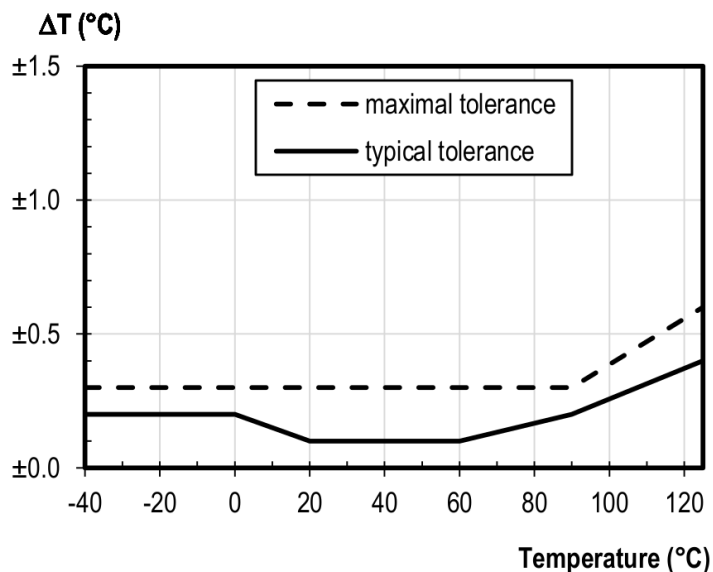


Abbildung 4.7: Toleranz der Temperaturmessung  $\Delta T$  des SHT-35 in Abhängigkeit der Temperatur [33]

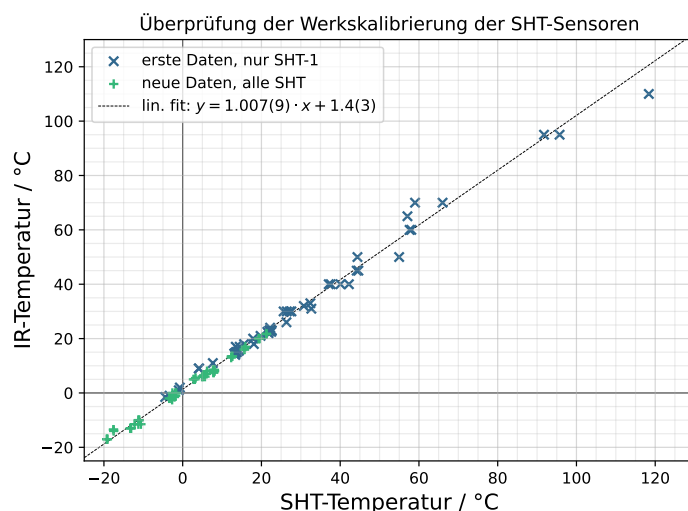


Abbildung 4.8: Überprüfung der Kalibrierung der SHT-Sensoren, es ist die mit dem IR gemessene Temperatur der Widerstandsblöcke gegen die mit den SHTs gemessene Temperatur aufgetragen. Die alten Daten sind aus den ersten Messungen mit SHT-1. Die neuen Daten sind von allen drei SHT-Sensoren rund sieben Wochen später. Es wurde eine lineare Anpassung mit allen Daten durchgeführt, die IR-Daten haben dabei einen Fehler von  $1^\circ\text{C}$ . Das gemessene Offset von  $(1,4 \pm 0,3)^\circ\text{C}$  kann durch einen Versatz in dem ungeeichten Infrarotthermometer kommen oder durch die Tatsache, dass mit dem IR auf dem lackierten Kühlkörper der Widerstände gemessen werden musste, welcher wärmer als der Aluminiumblock mit dem SHT ist. Da aber die Steigung mit  $(1,007 \pm 0,009)^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  nahe an 1 liegt, sind offensichtlich alle SHTs von Werk her gut kalibriert. Die Fehler wurden zur Übersicht nicht eingezeichnet.

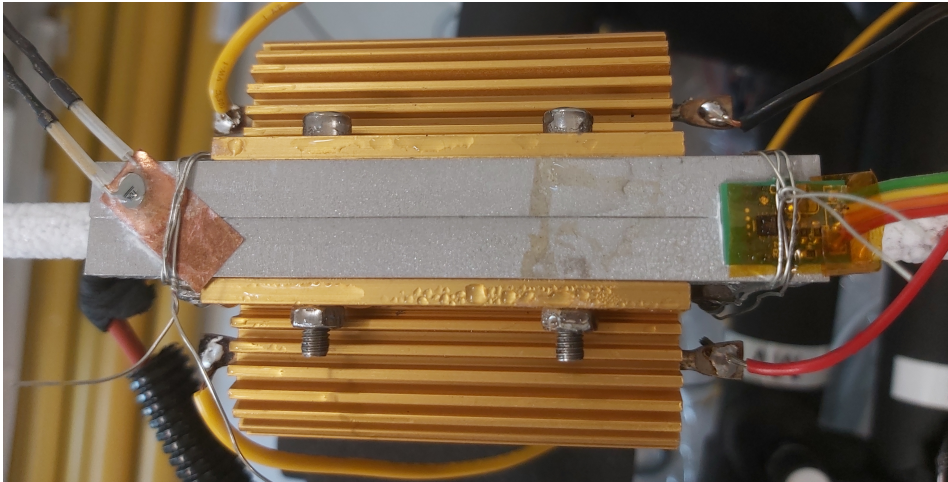


Abbildung 4.9: Ein NTC- (links) und SHT-Sensor (rechts) auf einem der Widerstandsblöcke. Die Drahtbefestigung wurde teils durch Kabelbinder ersetzt, da diese für einen sichereren Halt sorgen. Beide Sensoren sind gegen Kondenswasser abgeklebt. Die NTCs wurden zusätzlich noch mit Klebeband gegen Zugluft abgedeckt.

IR gemessenen Temperatur entspricht. Auch gab es nach knapp sieben Wochen keine offensichtliche Abweichung wie bei den NTCs.

Darüber hinaus wurden zwei NTCs auf kleine Kupferbleche geklebt, was einen besseren thermischen Kontakt zu den Widerstandsblöcken erzielt. Abbildung 4.9 zeigt einen NTC- und SHT-Sensor auf einem Widerstandsblock. Zusätzlich wurden auch die NTCs mit Kleber abgeklebt, da Kondenswasser an die Kontakte der NTCs kommen kann und somit den gemessenen Widerstand, und damit auch die berechnete Temperatur, beeinflussen kann. Noch dazu wurden die NTCs mit Klebeband abgedeckt, da einfache Zugluft im Labor die Temperatur der NTCs beeinflusst hat. Des Weiteren wurde der Wärmeübertrag zwischen den Lastwiderständen und dem CO<sub>2</sub>-Kühlrohr durch Applikation von Wärmeleitpaste verbessert.

Eine ausführliche Diskussion der Entwicklung der statistischen Fehler der Temperaturmessung, vor allem die der NTCs, ist im [Anhang](#) mit Abbildung A.2 und Tabelle A.1 zu finden. Letztendlich wurde der statistische Fehler der Temperaturmessung auf 0,05 °C bestimmt, und ist somit gegenüber der Messungenauigkeit der Sensoren vernachlässigbar. Die Temperaturmessung der SHT-Sensoren hat also einen Fehler von 0,2 °C, und die der NTC-Sensoren einen Fehler von mindestens 1,7 °C. Die NTCs sind also wesentlich ungenauer als die SHTs, aber liefern dennoch eine zusätzliche Redundanz.

### 4.3 Datenverarbeitung

Zur Datenverarbeitung wurde fast ausschließlich Python verwendet. Die Firmware der Mikrocontroller wurde in C-Code geschrieben. Programme zur Kommunikation mit den Geräten, sowie Hilfestellungen zum korrekten Verkabeln der Temperatursensoren wurden aus [34] und [35] entnommen. Anpassungskurven wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate (engl. *Least squares approximation*) mithilfe des Python Paketes Scipy [36] durchgeführt.

---

## Charakterisierung von MARTA

---

Zur Charakterisierung von MARTA soll ein Zusammenhang zwischen der maximalen Kühlleistung, also der minimalen nötigen Heizlast für einen heat-up, in Abhängigkeit von  $T_{\text{set}}$  untersucht werden. Zunächst ist dabei die  $\text{CO}_2$ -Flussrate  $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$  sowie die mit dem Infrarotthermometer gemessene, über alle Messungen recht konstant gebliebene, Raumtemperatur  $T_{\text{room}} = (22 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ .

Dafür wurden erste Testmessungen durchgeführt, um sich mit den Eigenschaften des Systems vertraut zu machen und es wurden zwei Messmethoden zur Vermessung der maximalen Kühlleistung entwickelt. Anschließend wird solch eine durchgeführte Vermessung diskutiert. Darüber hinaus wird auch der Einfluss der Parameter  $T_{\text{room}}$  und  $q_{\text{CO}_2}$  sowie die Ventileinstellung von MV5 auf die Kühlleistung betrachtet.

### 5.1 Entwicklung der Messmethodik

Zuerst wurde für  $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$  bei unterschiedlichen  $T_{\text{set}}$  geprüft, ab welcher Heizlast  $P_{\text{heat}}$  das  $T_{\text{fbk}}$  den Soll-Wert  $T_{\text{set}}$  überschreitet. Damit kann dann auf die Schrittweite von  $P_{\text{heat}}$  genau die maximale Kühlleistung  $P_{\text{max}}$  bestimmt werden. Der Fehler der Leistung von 1 % wird hierbei vernachlässigt. Eine Messreihe für  $T_{\text{set}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$  ist in Abbildung 5.1 aufgetragen. Es fällt sofort auf, dass mit der Einstellung von MV5 sich die Temperatur der Lastwiderstände  $T_{\text{R}}$  verändert sowie  $T_{\text{fbk}}$  beeinflusst wird.

Daraufhin wurden sowohl  $T_{\text{fbk}}$  als auch  $T_{\text{R}}$ , im Folgenden exemplarisch die von SHT-0 gemessene Temperatur, auf eine Abhängigkeit von der Einstellung von MV5 hin untersucht. Für  $T_{\text{fbk}}$  ist dies nur in einem heat-up möglich, da im stabilen Kühlbereich  $T_{\text{fbk}} = T_{\text{set}}$  konstant bleibt. Da jedoch keine Messung des Druckabfalls über MV5 vorliegt, wird entsprechend  $dP_{\text{pump}}$  als Indiz für den Druckabfall genommen. Der Druckabfall über MV5 ist im Allgemeinen jedoch nicht ganz gleich  $dP_{\text{pump}}$ , da ein Druckgradient in der  $\text{CO}_2$ -Leitung entlang des Experiments herrscht. Jedoch skaliert  $dP_{\text{pump}}$  mit der Einstellung von MV5 und ist daher eine akzeptable Quantifizierung der Ventileinstellung. Für den Wert von  $dP_{\text{pump}}$  wird, nachdem sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat, entsprechend den beobachteten Schwankungen ein Fehler von 0,1 bar angenommen. Es wurde ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen  $T_{\text{R}}$  und  $dP_{\text{pump}}$  festgestellt, welcher in Abbildung 5.2 aufgetragen ist. Mit kleinerem  $dP_{\text{pump}}$  sinkt  $T_{\text{R}}$  immer. Entsprechend der Annahme aus Kapitel 3.2 sagt ein geringeres  $dP_{\text{pump}}$ , also ein Öffnen von MV5, für eine geringere Temperatur im Experiment.

In Abbildung 5.3 ist das sich im heat-up eingestellte  $T_{\text{fbk}}$  gegen  $dP_{\text{pump}}$  aufgetragen. Ein eindeutiger

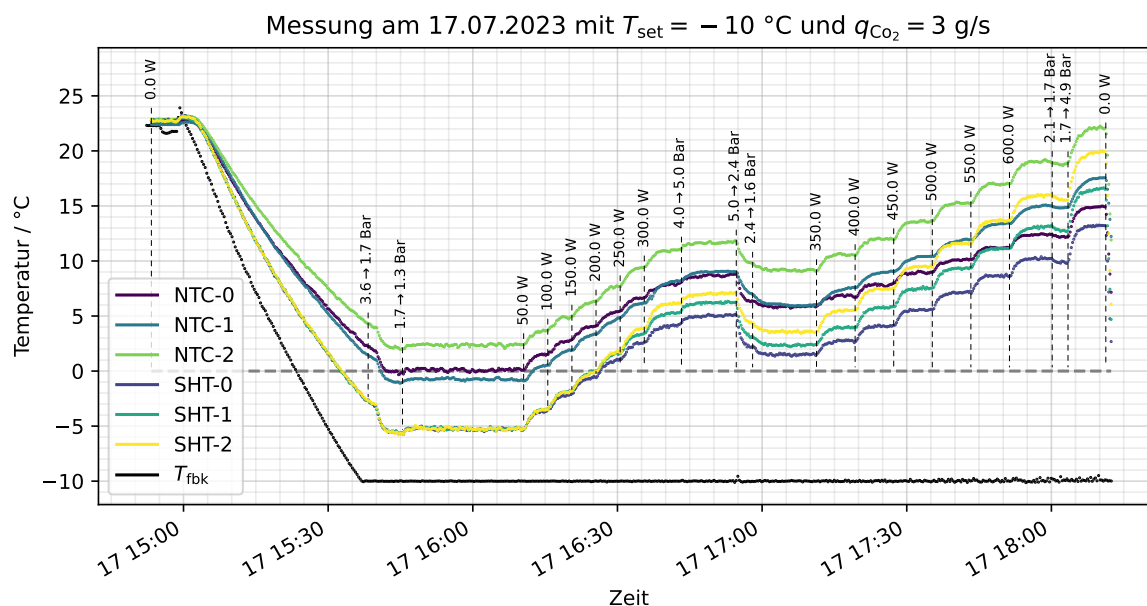


Abbildung 5.1: Eine Messreihe bei  $q_{\text{CO}_2} = 3\text{ g s}^{-1}$  und  $T_{\text{set}} = -10\text{ °C}$ . Es ist der zeitliche Verlauf der gemessenen Temperatur aller Temperatursensoren, sowie  $T_{\text{fbk}}$  eingezeichnet. Auch ist die schrittweise Erhöhung von  $P_{\text{heat}}$  sowie Änderungen an MV5 mit dem entsprechenden  $dP_{\text{pump}}$  Werten vor- und nachher markiert. Es ist kein heat-up zu erkennen, da  $T_{\text{fbk}}$  den Wert von  $T_{\text{set}}$  selbst bei der maximalen Heizlast von 600 W halten konnte. Da mit Erhöhung von  $P_{\text{heat}}$  auch  $dP_{\text{pump}}$  anstieg, musste kurz vor 17 Uhr das Ventil MV5 ausreichend geöffnet werden, damit  $dP_{\text{pump}}$  im weiteren Verlauf der Messung nicht über 5 bar steigt. Damit war auch eine Temperaturänderung am Experiment zu beobachten. Außerdem hat das Öffnen von MV5 um 16:54 Uhr mit rapidem Druckabfall eine kurze Diskontinuität in  $T_{\text{fbk}}$  bewirkt. Fehler sind zur Übersicht nicht eingezeichnet.

Zusammenhang konnte jedoch nicht festgestellt werden. Da  $T_{\text{fbk}}$  bei konstanten Betriebsparametern im heat-up schwankt und aufgrund äußerer Einflüsse nicht eindeutig reproduzierbar ist, wird der Fehler auf  $0,5\text{ °C}$  abgeschätzt. Somit sind die Veränderungen von  $T_{\text{fbk}}$  in Abhängigkeit von  $dP_{\text{pump}}$  auch nicht signifikant. Das Ventil wird daher für eine konsequente Messmethodik immer möglichst offen, bei einem Wert für  $dP_{\text{pump}}$  zwischen 1,2 – 1,5 bar gehalten. Gegebenenfalls kann bei hohem  $P_{\text{heat}}$  und niedrigem  $T_{\text{set}}$  dies jedoch nicht erreicht werden, da dann auch bei maximal geöffnetem MV5  $dP_{\text{pump}} > 1,5\text{ bar}$  ist.

Die beschriebene Messmethode zur Bestimmung der maximalen Kühlleistung (Methode-1) ist jedoch zeitintensiv, weil für jede Messung bei einem Wert für  $T_{\text{set}}$  erst das System auf  $T_{\text{set}}$  herunterkühlen muss, und anschließend möglichst viele  $P_{\text{heat}}$  durchlaufen werden, wobei bei jedem neuen Wert von  $P_{\text{heat}}$  gewartet werden muss, ob denn ein heat-up vorliegt. Daraufhin wurde eine neue Messmethode (Methode-2) entwickelt, bei der  $T_{\text{set}}$  so klein eingestellt wird, dass bei  $P_{\text{heat}} = 0\text{ W}$  schon ein heat-up vorliegt. Dies liegt also unter dem minimal stabilen Arbeitspunkt von MARTA, bei dem die Kühlleistung gerade ausreicht um die Heizlast durch das Umfeld des Experimentes, also hauptsächlich die Raumtemperatur, auszugleichen. Dann werden einige Werte für  $P_{\text{heat}}$  durchlaufen und untersucht, welchen Wert  $T_{\text{fbk}}$  annimmt. Dieser Wert ist dann die minimale Kühlleistungstemperatur  $T_{\text{min}}$ , also der minimal einstellbare Wert für  $T_{\text{set}}$  bei einem gegebenem  $P_{\text{heat}}$ , sodass sich das System gerade an der Grenze zum heat-up befindet. Diese Grenze des Kühlbereiches von MARTA lässt sich somit durch eine maximale kühlbare

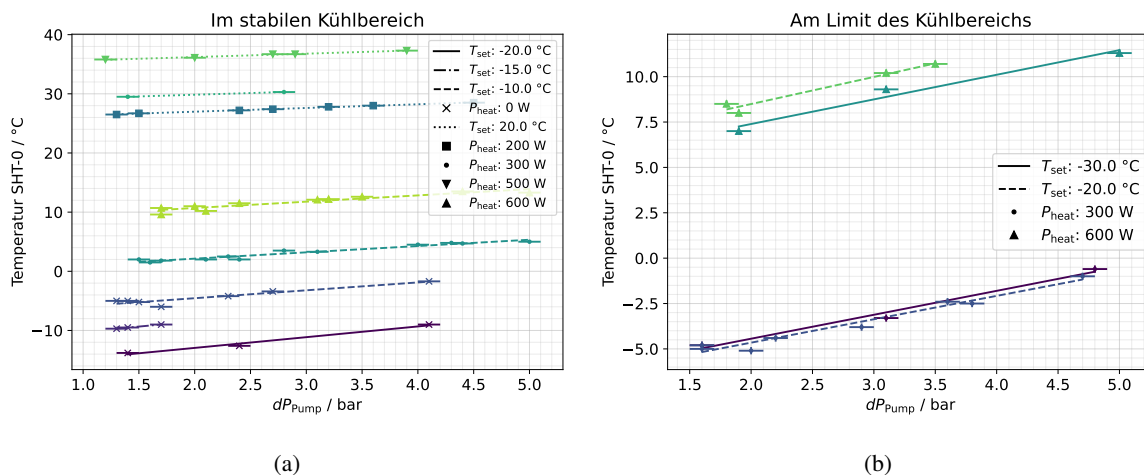


Abbildung 5.2: Abhängigkeit der Temperatur an SHT-0 von  $dp_{pump}$  ohne (a) und mit heat-up (b) bei unterschiedlichen Betriebsparametern. An den Punktgruppen wurden lineare Anpassungen durchgeführt, das Ergebnis der Anpassungen ist im Anhang in Tabelle A.2 zu finden. Es ist ein eindeutiger Abfall der Temperatur mit abnehmendem  $dp_{pump}$  zu sehen. Außerdem bleibt im heat-up das Verhalten der Temperatur gegenüber  $dp_{pump}$  bei gleichem  $P_{heat}$  aber unterschiedlichem  $T_{set}$  innerhalb der Anpassungsfehler konsequent. Zusätzlich fällt auf, dass im stabilen Kühlbereich mit steigendem  $T_{set}$ , also steigendem Druck in der Kühlleitung, die Steigung der Anpassungsgeraden und damit die Abhängigkeit gegenüber  $dp_{pump}$  abnimmt. Ein erhöhter absoluter Druck in der Kühlleitung sorgt also für eine stabilere, den Einstellungen von MV5 unabhängige Temperatur im Experiment.

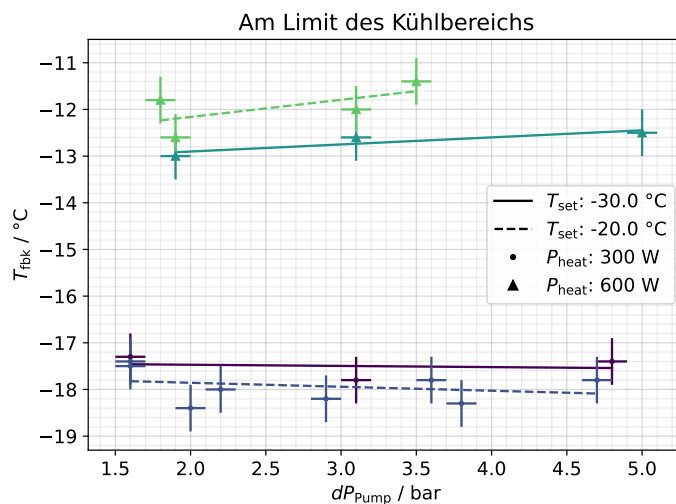


Abbildung 5.3: Es ist  $T_{fbk}$  gegen  $dp_{pump}$  bei unterschiedlichen Betriebsparametern im heat-up aufgetragen. An den Punktgruppen wurden lineare Anpassungen durchgeführt, das Ergebnis der Anpassungen ist im Anhang in Tabelle A.2 zu finden. Da die Steigung der Anpassungsgeraden innerhalb der Fehler nicht signifikant von Null abweicht, ist keine eindeutige Abhängigkeit von  $T_{fbk}$  gegenüber  $dp_{pump}$  zu erkennen. Die maximale Kühlleistung von MARTA ist also in erster Linie unabhängig von der Ventileinstellung MV5.

Heizlast  $P_{\max}$  bei einer entsprechenden minimalen Kühlsetpointtemperatur  $T_{\min}$  beschreiben. Damit liegt die Messungenauigkeit nicht in der Schrittweite von  $P_{\text{heat}}$ , sondern in der Genauigkeit der Bestimmung von  $T_{\min}$ . Es kann also die Schrittweite von  $P_{\text{heat}}$  erhöht werden, was die Messdauer verkürzt. Die Ungenauigkeit von 1% auf  $P_{\text{heat}}$  besteht jedoch weiterhin. Der Fehler für  $T_{\min}$  wird entsprechend der Messungenauigkeit von  $T_{\text{fbk}}$  als  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  angenommen.

## 5.2 Vermessung der maximalen Kühlleistung

Es wurden nun bei  $q_{\text{CO}_2} = 3\text{ g s}^{-1}$  mehrere Messungen nach Methode-1 und -2 durchgeführt, und das Ergebnis der Messungen ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Es ist der stabile Kühlbereich eingezeichnet, und das Plateau bei 600 W ist dabei keine Grenze für die Kühlleistung, sondern resultiert lediglich aus der maximalen Heizlast der Widerstände von 600 W. Noch dazu ist zum Vergleich die in Kapitel 3.3 gezeigte maximale Kühlleistung des MARTA Prototypen mit  $q_{\text{CO}_2} = 2,6\text{ g s}^{-1}$  als Referenz zu sehen. Es wird, wie in der Referenz, ein linearer Anstieg der Kühlleistung angenommen. Das Ergebnis der Messung stimmt qualitativ mit der Referenz überein, jedoch ist eine reduzierte Kühlleistung zu niedrigem  $P_{\text{heat}}$  zu beobachten. Es steht zu vermuten, dass die Referenzmessung unter optimalen Bedingen gemessen wurde, um bestmögliche Kühlleistung zu erzielen. Insbesondere ist die Raumtemperatur  $T_{\text{room}} = (22 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei der Vermessung von MARTA laut Anleitung die obere Grenze für optimale Kühlleistung. Eine erhöhte Raumtemperatur könnte die Kühlleistung vor allem bei niedriger  $\text{CO}_2$ -Temperatur reduzieren, da die zusätzliche Heizlast durch die Raumtemperatur mit der Temperaturdifferenz steigt.

Daraufhin wird also untersucht, welchen Einfluss  $T_{\text{room}}$  auf den stabilen Kühlbereich hat. Die Raum-

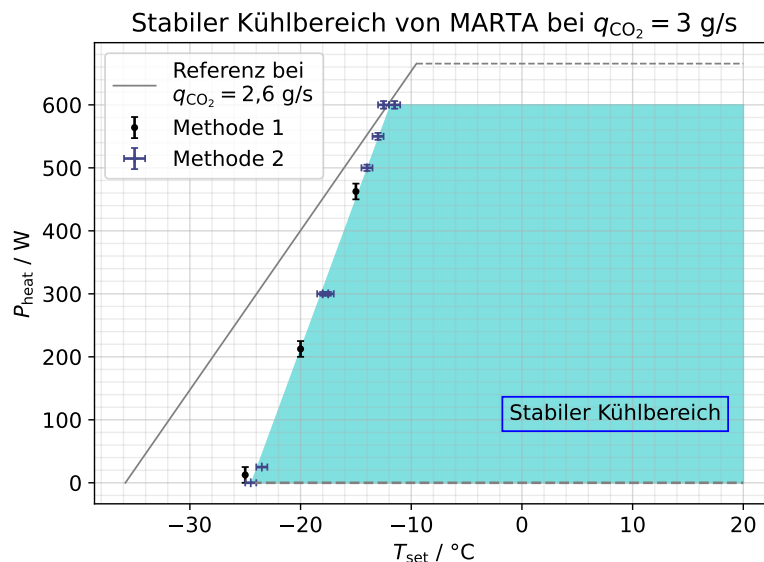


Abbildung 5.4: Stabiler Kühlbereich von MARTA bei  $q_{\text{CO}_2} = 3\text{ g s}^{-1}$ . Methode-1 wurde bei konstantem  $T_{\text{set}}$  gemessen, bis ein heat-up vorliegt. Bei Methode-2 wird im heat-up für unterschiedliche  $P_{\text{heat}}$  das  $T_{\text{fbk}}$  vermessen. Es ist zu sehen, dass Methode-1 und -2 übereinstimmende Ergebnisse liefern. Beim Plateau wurde das Maximum von  $P_{\text{heat}}$  mit 600 W erreicht. Die Referenz bei  $q_{\text{CO}_2} = 2,6\text{ g s}^{-1}$ , beschrieben in Kapitel 3.3, ist aus [25].

$P_{\text{heat}} / \text{W}$	$T_{\text{min}} / ^\circ\text{C}$ , bei $T_1$	$T_{\text{min}} / ^\circ\text{C}$ , bei $T_2$	Differenz der $T_{\text{min}} / ^\circ\text{C}$
0	$-24,5 \pm 0,5$	$-26,0 \pm 0,5$	$-1,5 \pm 0,7$
300	$-17,8 \pm 0,4$	$-19,0 \pm 0,5$	$-1,3 \pm 0,6$
600	$-12,0 \pm 0,4$	$-14,5 \pm 0,5$	$-2,5 \pm 0,6$

Tabelle 5.1: Werte für  $T_{\text{min}}$  bei unterschiedlichen Raumtemperaturen  $T_1 = (22 \pm 1) ^\circ\text{C}$  und  $T_2 = (18 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . Für 300 W und 600 W Heizlast liegen bei  $T_1$  zwei Datenpunkte vor, die gemittelt wurden. Es ist zu erkennen, dass bei  $T_2$  der Wert für  $T_{\text{min}}$  niedriger ist, im Schnitt um  $(1,8 \pm 0,4) ^\circ\text{C}$ .

temperatur des Labors, in dem sich MARTA befindet, konnte von  $T_1 = (22 \pm 1) ^\circ\text{C}$  auf  $T_2 = (18 \pm 1) ^\circ\text{C}$  gesenkt werden. Anschließend wurde nach Methode-2  $T_{\text{min}}$  bei 0 W, 300 W und 600 W vermessen. Diese Ergebnisse wurden dann mit den entsprechenden Werten der vorherigen Messungen bei der Raumtemperatur  $T_1$  verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 aufgezählt. Es liegt eine eindeutige Reduzierung von  $T_{\text{min}}$ , im Schnitt um  $(1,8 \pm 0,4) ^\circ\text{C}$ , vor. Dies ist jedoch in Angesicht der Raumtemperaturdifferenz von  $(4,0 \pm 1,4) ^\circ\text{C}$  eine geringfügige Verbesserung der Kühlung. Insbesondere konnte dadurch auch nicht die Referenzkühlleistung erreicht werden.

### 5.3 Abhängigkeit der Kühlleistung von der $\text{CO}_2$ -Flussrate

Zuletzt wurde nach Methode-2 der stabile Kühlbereich von MARTA in Abhängigkeit von der  $\text{CO}_2$ -Flussrate  $q_{\text{CO}_2}$  untersucht. Zuerst wurde die maximale Kühlleistung bei  $q_{\text{CO}_2} = 1,5 \text{ g s}^{-1}$  vermessen, das Ergebnis ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Es fällt sofort auf, dass die maximale Kühlleistung keinem linearen Verhalten mehr folgt, daher wurde eine exponentielle Anpassung vorgenommen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Ursache für dieses Verhalten nicht mehr erschlossen werden und ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen. Für diese Untersuchungen wäre es auch von Vorteil den Druck, sowie die Temperatur des  $\text{CO}_2$  direkt vor und nach dem Experiment zu messen, um den gesamten Kühlkreislauf im Phasendiagramm rekonstruieren zu können. Dies konnte am vorhandenen Aufbau im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt werden. Noch dazu stieg bei  $P_{\text{heat}} > 360 \text{ W}$  die mit dem SHT-2 am Widerstandsblock gemessene Temperatur  $T_{R_2}$  sehr schnell gegenüber den weiterhin konstanten Temperaturen der SHT-0 und SHT-1 an. Dieses Phänomen wurde auch schon im stabilen Kühlbereich bei Messungen mit  $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$  und  $T_{\text{set}} = 20 ^\circ\text{C}$  beobachtet und mit dem Infrarotthermometer bestätigt.  $T_{R_2}$  stieg dabei auf über  $100 ^\circ\text{C}$  an, woraufhin die Messung abgebrochen wurde. Dieses Verhalten ist auf einen temperaturabhängigen thermischen Kontakt zwischen Widerstandsblock und Kühlrohr zurückzuführen. Damit wird sich ab einer bestimmten Temperatur der Wärmekontakt verschlechtern, sodass die Temperatur weiter steigt und sich der Wärmekontakt weiter verschlechtert. Dadurch wurde der mögliche Messbereich für die maximale Kühlleistung auf  $P_{\text{heat}} \leq 360 \text{ W}$  begrenzt. Außerdem sind die beiden Daten einer Messreihe bei  $T_{\text{set}} = 5 ^\circ\text{C}$  stark abweichend, und wurden aus der maximalen Kühlleistungsbestimmung ausgenommen. Der Grund für diese Abweichung liegt darin, dass das Kältemittel im primären Kreislauf der MARTA wesentlich wärmer war. Üblicherweise liegt dessen Temperatur unter  $-40 ^\circ\text{C}$ , jedoch lag sie bei dieser Messreihe bei rund  $-30 ^\circ\text{C}$ . Offensichtlich war also die Kühlleistung von MARTA durch eine geringere Kühlung des primären Kühlkreislaufes reduziert, allerdings ist dieses Verhalten zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht verstanden. Weitere Untersuchungen auf eine mögliche Abhängigkeit der Kühlung des primären Kreislaufes gegenüber  $T_{\text{set}}$  sind dementsprechend

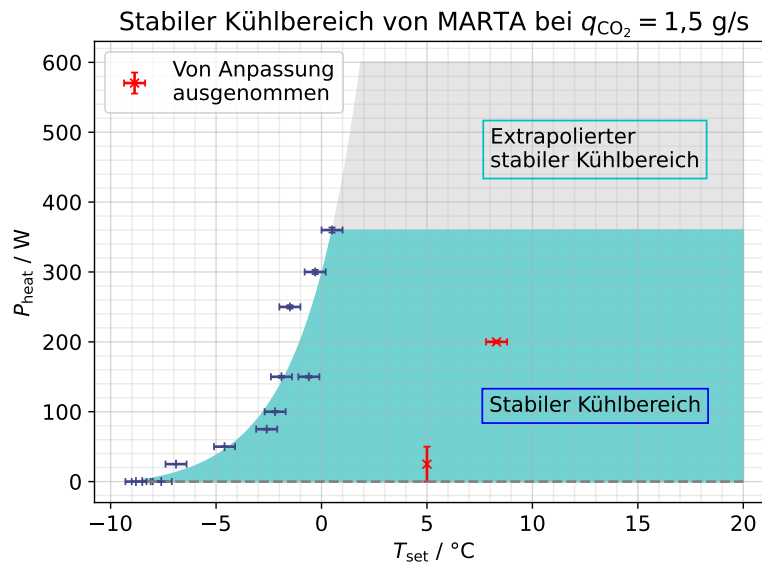


Abbildung 5.5: Stabiler Kühlbereich von MARTA bei  $q_{\text{CO}_2} = 1,5 \text{ g s}^{-1}$ , vermessen nach Methode-2 mit mehreren Messreihen. Da der stabile Kühlbereich keinem linearen Verhalten folgt, wurde eine exponentielle Anpassung durchgeführt. Eine Messreihe wurde ausgenommen, da der primäre Kühlkreislauf von MARTA nur reduziert kühlte. Noch dazu konnte ab  $P_{\text{heat}} > 360 \text{ W}$  aufgrund eines nicht ausreichenden Wärmekontakts zwischen Widerstand und Kühlleitung die maximale Kühlleistung nicht vermessen werden, eine Extrapolation ist jedoch eingezeichnet.

notwendig. Letztendlich ist aber eine eindeutige Reduzierung der maximalen Kühlleistung mit einer Senkung der  $\text{CO}_2$ -Flussrate zu erkennen.

Analog wurde die Messung auch für  $q_{\text{CO}_2} = 4 \text{ g s}^{-1}$  durchgeführt. Dafür wurde die Pumpe außerhalb des sicheren Bereiches bei  $f_{\text{pump}} > 5 \text{ krPM}$  betrieben. Wie erwartet hat sich die Kühlleistung erhöht und es gab hierbei keine Besonderheiten der Messung. Die maximale Kühlleistung in Abhängigkeit von  $q_{\text{CO}_2}$  ist in Abbildung 5.6 zusammengefasst.

## 5.4 Ergebnisse für die ITk-Pixeldetektoren Qualitätskontrolle

Die erwartete Kühlleistung von MARTA, entsprechend der Referenz und der von der Anleitung angegebene Kühlleistung von mindestens  $250 \text{ W}$  bei  $T_{\text{set}} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ , konnte auch mit optimiertem  $T_{\text{room}}$  und erhöhtem  $q_{\text{CO}_2}$  nicht erreicht werden. Für die zu kühlende Last bei den Qualitätskontrollen der ITk-Pixeldetektoren von rund  $400 \text{ W}$  [19] ist die Kühlleistung von MARTA dennoch ausreichend. Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, lag bei dieser Heizlast die Temperatur der Widerstandsblöcke im stabilen Kühlbereich bei  $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$  und  $T_{\text{set}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$  unter  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Diese Temperatur ist aber von dem Wärmeübertrag zwischen dem zu kühlendem Experiment und der  $\text{CO}_2$ -Kühlleitung abhängig. Die theoretische minimale Temperatur des Experiments entspricht demnach  $T_{\text{min}}$ , und ist entsprechend in Abbildung 5.6 ablesbar. Für  $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$  ist bei  $P_{\text{heat}} = 400 \text{ W}$  also eine minimale  $\text{CO}_2$ -Temperatur von rund  $-16 \text{ }^\circ\text{C}$  möglich. Da für die verwendeten Widerstandsblöcke auch ein suboptimaler Wärmekontakt zu der Kühlleitung beobachtet wurde, ist zu erwarten, dass die ITk-Pixeldetektoren unter  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  gekühlt werden können.

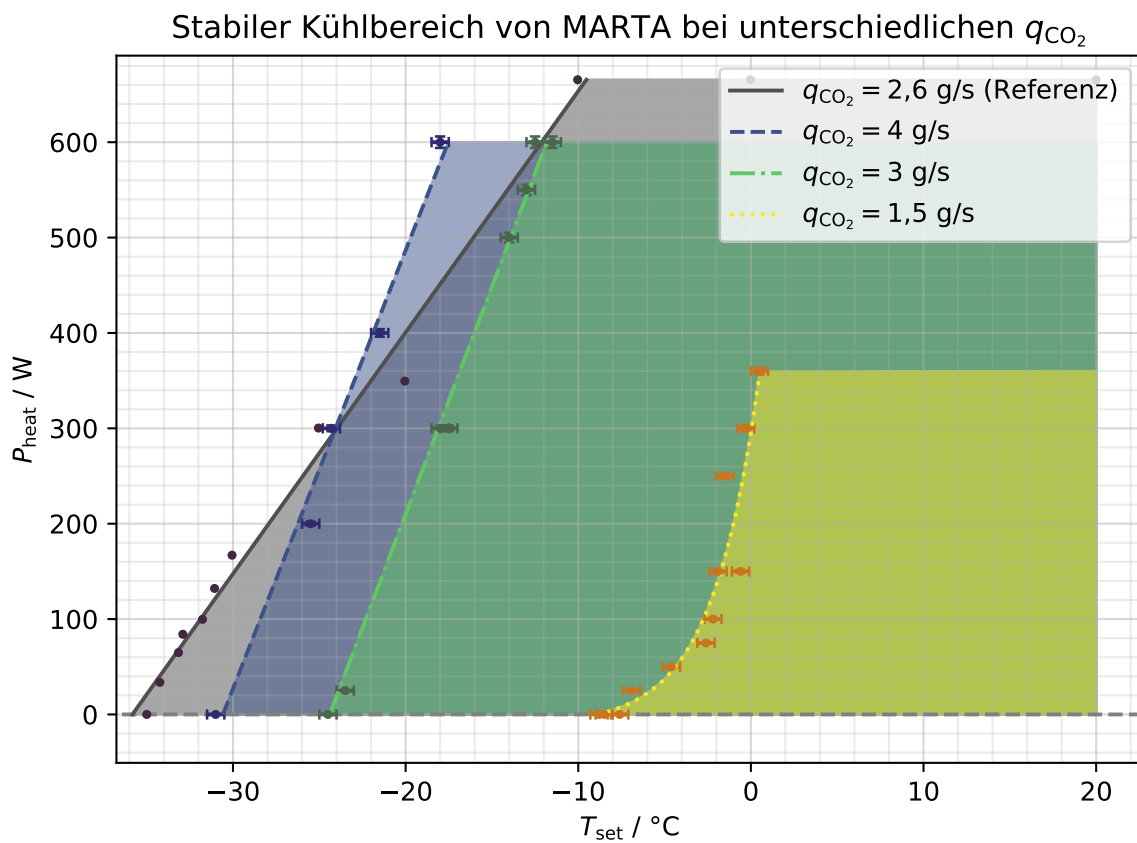


Abbildung 5.6: Stabiler Kühlbereich von MARTA bei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Flussraten  $q_{\text{CO}_2}$ , mit der Referenz aus [25]. Die maximale Kühlleistung steigt mit  $q_{\text{CO}_2}$ .

---

## Fazit und Ausblick

---

Im Rahmen dieser Arbeit konnte das für die Qualitätskontrolle in der ITk-Pixeldetektorproduktion vorgesehene I-2PACL CO<sub>2</sub>-Kühlsystem MARTA erfolgreich im Hinblick auf die maximale Kühlleistung charakterisiert werden.

Im Zuge der Arbeit wurde MARTA problemlos in Betrieb genommen, ein Aufbau zur Bestimmung der Kühlleistung umgesetzt und die Temperaturmessung an dem zu kühlenden Experiment, den Heizwiderständen, optimiert. Auch wurde eine verbesserte Messmethode zur Bestimmung der maximalen Kühlleistung entwickelt.

Es konnte erfolgreich der stabile Kühlbereich von MARTA charakterisiert werden und die Abhängigkeit der maximalen Kühlleistung von der CO<sub>2</sub>-Flussrate  $q_{\text{CO}_2}$  bestätigt werden. So konnte bei  $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$  eine Heizlast von 400 W auf unter 10 °C gekühlt werden. Die minimal erreichbare CO<sub>2</sub>-Temperatur im Akkumulator  $T_{\text{min}}$  ist dabei rund -16 °C. Mit einem Erhöhen von  $q_{\text{CO}_2}$  auf  $4 \text{ g s}^{-1}$  konnte  $T_{\text{min}}$  weiter auf knapp -22 °C reduziert werden. Außerdem wurde der Einfluss der Raumtemperatur sowie die Einstellung des CO<sub>2</sub>-Zuflussventils vor dem Experiment MV5 auf die Kühlleistung untersucht. Eine Senkung der Raumtemperatur von  $(4,0 \pm 1,4) \text{ °C}$  hat  $T_{\text{min}}$  im Durchschnitt um  $(1,8 \pm 0,4) \text{ °C}$  gesenkt, was kein signifikanter Zugewinn an Kühlleistung ist. Eine eindeutige Auswirkung von der Einstellung von MV5 auf die maximale Kühlleistung konnte nicht beobachtet werden, jedoch hat sich die Temperatur des Experiments den Erwartungen entsprechend verändert. Die Referenzmessung sowie die in der Anleitung angegebene Kühlleistung von mindestens 250 W bei einer Setpointtemperatur im Akkumulator von -30 °C konnte jedoch nicht erreicht werden, aber die vermessene maximale Kühlleistung wird für den vorgesehenen Einsatzzweck zur Kühlung von ITk-Pixeldetektoren ausreichen.

Inhalt weiterer Untersuchungen könnte ein erweitertes Verständnis des Kühlsystems sein, insbesondere im Hinblick auf eine eindeutige Identifikation des Verhaltens der Grenze des stabilen Kühlbereiches, welches bei unterschiedlichen Bedingungen als linear oder exponentiell beobachtet wurde. Dafür wären weitere Messpunkte des Drucks und der Temperatur des CO<sub>2</sub> entlang des Experiments und des Ventils MV5 sinnvoll. Ebenso könnten weitere Analysen sich mit dem Finden zusätzlicher Optimierungsmöglichkeiten der Kühlleistung befassen.

## Anhang

---

Dieser Anhang beinhaltet die Kalibrierungskurven aller NTCs, eine detailliertere Diskussion der statistischen Fehler der Temperaturmessung sowie die Anpassungsparameter der Untersuchungen der Auswirkungen der Einstellung von MV5.

### **Kalibrierungskurven der NTCs**

In Abbildung [A.1](#) sind die Kalibrierungskurven aller NTCs gezeigt, welche in Abbildung [4.5](#) erwähnt wurden.

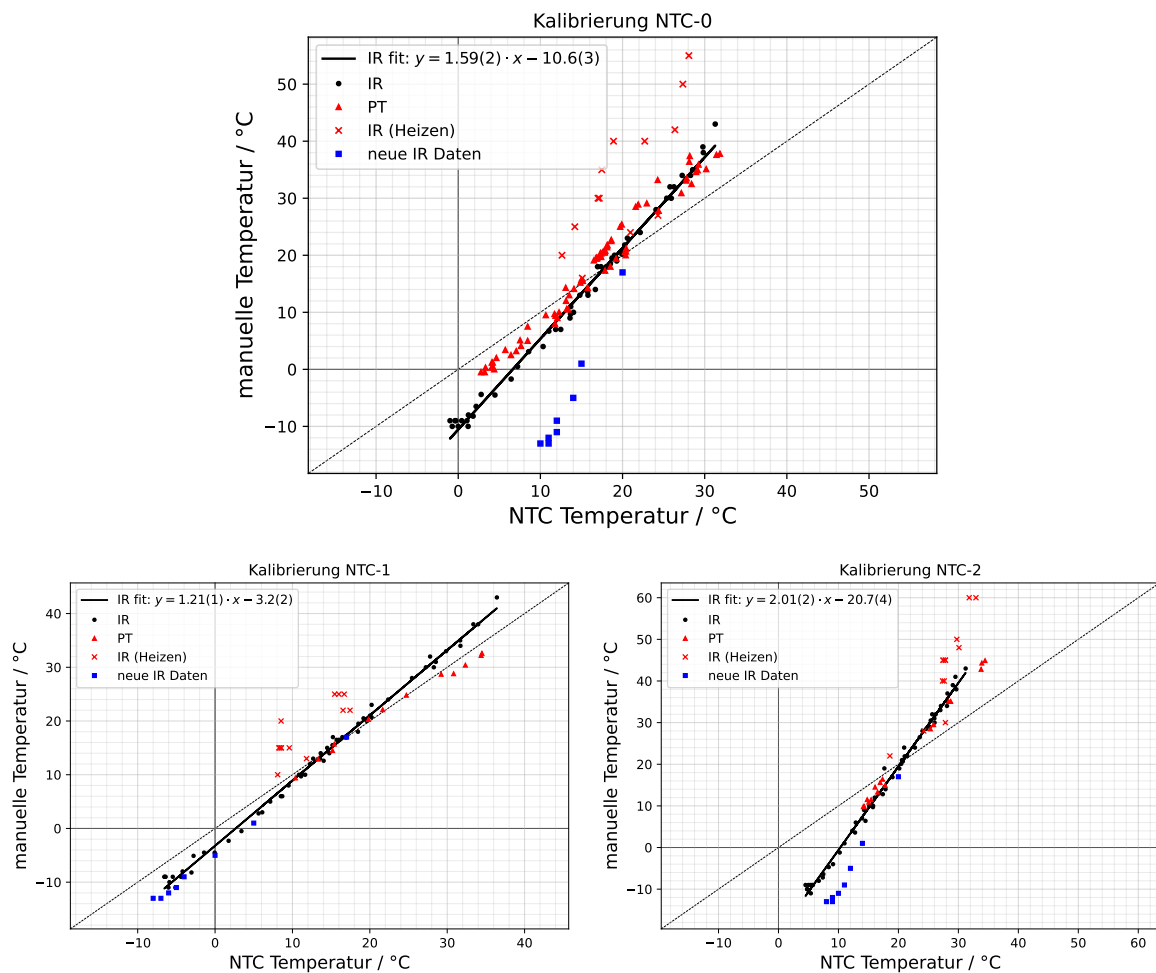


Abbildung A.1: Kalibrierung der NTCs, es ist die mit dem IR und PT manuell gemessene Temperatur der Widerstandsblöcke gegen die mit dem NTC gemessene Temperatur aufgetragen. Die Anpassungsgerade wurde nur für die schwarz eingezeichneten IR-Daten durchgeführt, also ausgenommen sind rot markierte PT-Daten sowie IR-Daten beim Aufheizen der Widerstände. Vor allem bei NTC-0 fällt auf, wie die neuen Daten nicht mehr zu der alten Kalibrierung passen. Die Fehler sind zur Übersicht nicht eingezeichnet.

## Diskussion der statistischen Fehler der Temperaturmessung

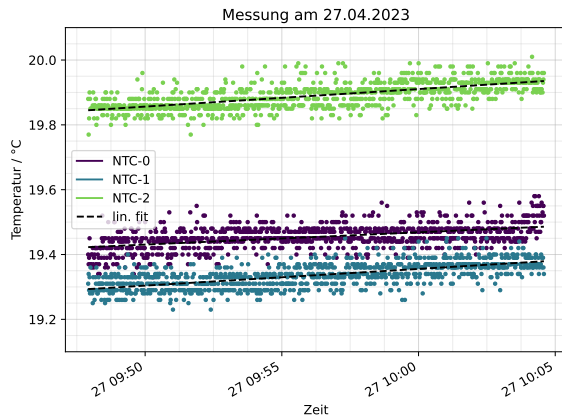
Wie in Kapitel 4.2.3 angesprochen, folgt eine Diskussion der Entwicklung der statistischen Fehler der NTC und SHT Temperaturmessung. In Abbildung A.2 sind die entsprechenden Messungen zusammenfassend abgebildet. An die von den Sensoren gemessenen Temperaturen wurden Kurven angepasst, um die Standardabweichung  $\Delta T$  gegenüber der Anpassung zu berechnen. Die dadurch berechneten Standardabweichungen sind in Tabelle A.1 aufgezählt.

Die Messung der NTC Temperaturen in Abbildung A.2(a) am 27. April wurde bei leicht steigender Raumtemperatur durchgeführt. Kurz zuvor wurden die NTCs erstmals mit Wärmeleitpaste und Klebeband an den Widerstandsblöcken befestigt. Die Standardabweichung der NTC Temperaturmessung wurde zu rund  $\Delta T_{\text{NTC(a)}} \approx 0,03 \text{ °C}$  bestimmt.

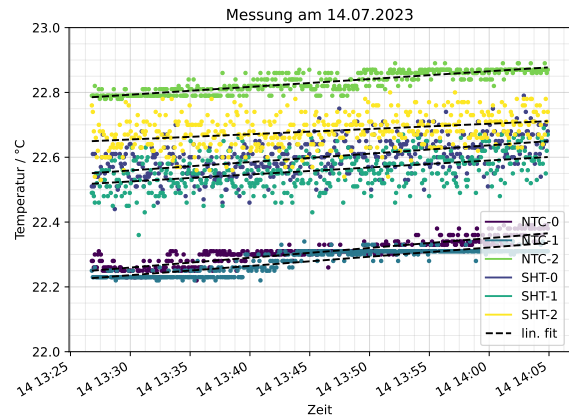
Bei der Messung am 14. Juli in Abbildung A.2(b) sind die Sensoren NTC-0 und NTC-2 nun auf Kupferbleche geklebt, welche mit Applikation von Wärmeleitpaste an den Widerstandsblöcken befestigt sind. NTC-1 ist jedoch weiterhin direkt mit Wärmeleitpaste und einem Kabelbinder an den Widerstandsblöcken angebracht. Die SHT-Sensoren wurden ebenso unter Verwendung von Wärmeleitpaste an den Aluminiumblöcken befestigt. Alle Sensoren sind nun aber gegen einen niederohmigen Kurzschluss durch Kondenswasser oder Wärmeleitpaste abgeklebt, und es wird die leicht steigende Raumtemperatur gemessen. Da sich die Standardabweichung der NTC Temperaturmessung auf  $\Delta T_{\text{NTC(b)}} \approx 0,02 \text{ °C}$  gegenüber  $\Delta T_{\text{NTC(a)}}$  reduziert hat, kann darauf geschlossen werden, dass ein Abkleben der NTC-Kontakte tatsächlich das Rauschen in der Widerstandsmessung reduziert. Bei den SHT-Sensoren ist die Standardabweichung von allen Sensoren gleichmäßiger verteilt, aber höher bei  $\Delta T_{\text{SHT(b)}} \approx 0,047 \text{ °C}$ .

Die Abbildung A.2(c) und A.2(d) zeigen Temperaturmessungen mit MARTA am aktiven Kühlen der heizenden Lastwiderstände. Die Standardabweichungen sind nun wegen der Temperaturvariation im Messbetrieb höher. Die Betriebsparameter  $T_{\text{set}} = -20 \text{ °C}$  und  $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$  sind in beiden Messungen gleich. Die Heizlasten wurden ähnlich von 200 W auf 300 W und von 225 W auf 275 W in zwei Schritten erhöht. Es wurden je Messung zwei exponentielle Anpassungen entsprechend den Leistungsschritten durchgeführt. Bei der Messung aus Abbildung A.2(c), als die NTCs noch nicht gegen Zugluft überklebt waren, schwankt die Messgenauigkeit der NTCs sehr, die Standardabweichung ist dabei mindestens  $\Delta T_{\text{NTC(c)}} \geq 0,07 \text{ °C}$ . Bei den SHTs ist  $\Delta T_{\text{SHT(c)}} \approx 0,07 \text{ °C}$ , wobei die Standardabweichung der Temperaturmessung von SHT-2 nur bei der ersten Anpassung mit rund  $0,12 \text{ °C}$  signifikant abweicht. Die Standardabweichung der Temperaturmessung mit NTC-2 deckt sich mit dieser Beobachtung, da dort der maximale statistische Fehler der NTC Temperaturmessung mit rund  $0,3 \text{ °C}$  erreicht wurde. Wie sich aus der Messung am 20. Juli in Abbildung A.2(d) ergibt, wurde durch das Überkleben der NTC-Sensoren die Messgenauigkeit auf  $\Delta T_{\text{NTC(d)}} \approx 0,05 \text{ °C}$  reduziert. Die Standardabweichung der Temperaturmessung mit den SHT-Sensoren hat sich auch leicht reduziert auf  $\Delta T_{\text{SHT(d)}} \approx 0,05 \text{ °C}$ , was aus der geringeren Temperaturerhöhung durch eine geringere Heizlasterhöhung folgen kann.

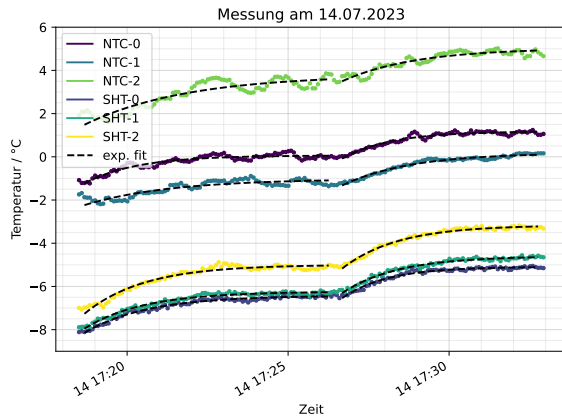
Zusammenfassend konnte also die statistische Messgenauigkeit der NTCs im Messbetrieb auf  $\Delta T_{\text{NTC(d)}} \approx 0,05 \text{ °C}$  reduziert werden. Die SHT-Sensoren haben ein stabileres Verhalten der statistischen Messgenauigkeit gezeigt, welche letztendlich zu  $\Delta T_{\text{SHT(d)}} \approx \Delta T_{\text{NTC(d)}}$  angenähert wird.



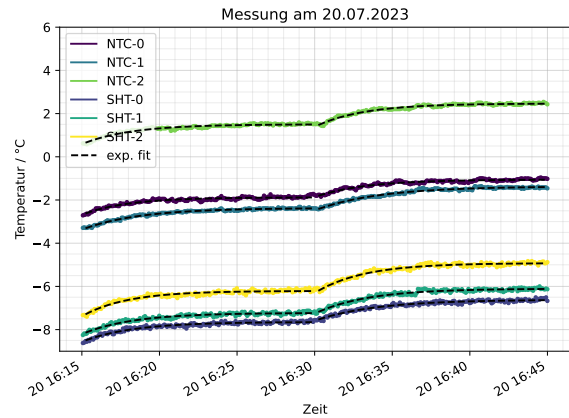
(a) NTC Messung mit linearer Anpassung



(b) NTC und SHT Messung mit linearer Anpassung



(c) NTC und SHT Messung mit exponentieller Anpassung in zwei Teilen, bevor NTCs mit Klebeband überklebt wurden



(d) NTC und SHT Messung mit exponentieller Anpassung in zwei Teilen, nachdem NTCs mit Klebeband überklebt wurden

Abbildung A.2: Temperaturmessungen der Sensoren mit Anpassungskurven. Die Standardabweichungen der Temperaturmessung gegenüber der Anpassung sind in Tabelle A.1 zu finden.

Die Messung in (a) wurde direkt nach dem ersten simplen Ankleben der NTCs mit Wärmeleitpaste und Klebeband an den Widerstandsblöcken bei Raumtemperatur aufgenommen.

In Abbildung (b) sind die NTCs schon mit Kupferblechen befestigt und alle Sensoren wurden gegen Kurzschlüsse abgeklebt. Diese Messung ist bei einer anderen Raumtemperatur aufgenommen.

In der letzten Messung in (d) sind die NTCs gegenüber der Messung in (c) mit Klebeband gegen Zugluft überklebt. Es fällt eine sichtbare Reduzierung der NTC Temperaturschwankungen auf, vor allem bei NTC-2 (oberster Graph). In diesen Messungen ist MARTA am aktiven kühlen der Heizlasten und es herrschen auch vergleichbare Bedingungen mit  $T_{\text{set}} = -20\text{ °C}$  und  $q_{\text{CO}_2} = 3\text{ g s}^{-1}$ . Die Heizlast wurde entsprechend in (c) von 200 W auf 250 W und dann auf 300 W erhöht und in (d) von 225 W auf 250 W und dann auf 275 W erhöht. Die exponentiellen Anpassungen haben einen Abstand von 10 s zu der Heizlastumstellung.

Sensor // Anzahl Daten- punkte N	Gerundete Standardabweichung $\Delta T$ aus Abb. A.2 / °C					
	A.2(a)	A.2(b)	A.2(c)		A.2(d)	
			Teil 1	Teil 2	Teil 1	Teil 2
NTC-0	0,0326	0,0179	0,1156	0,0845	0,0536	0,0511
NTC-1	0,0291	0,0181	0,1509	0,0696	0,0303	0,0424
NTC-2	0,0300	0,0168	0,2734	0,1506	0,0481	0,0442
SHT-0	-	0,0476	0,0722	0,0652	0,0534	0,0500
SHT-1	-	0,0473	0,0708	0,0658	0,0557	0,0584
SHT-2	-	0,0472	0,1196	0,0637	0,0653	0,0644
N	1 001	458	92	74	176	176

Tabelle A.1: Standardabweichung  $\Delta T$  der Temperaturmessung mit den unterschiedlichen Sensoren gegenüber einer Anpassungskurve nach den Messungen aus der Abbildung A.2.  $N$  ist die Anzahl der Datenpunkte, die zum berechnen der Standardabweichung verwendet wurden. Es ist zu sehen, dass für die letzte Temperaturmessung (A.2(d)) die Standardabweichung aller Sensoren gleichmäßig bei rund 0,05 °C liegt.

## Ergebnisse der Anpassungskurven aus Kapitel 5.1

In Tabelle A.2 sind die Ergebnisse der Anpassungsgeraden aus Abbildung 5.2 und 5.3 aufgezählt.

### Im stabilen Kühlbereich

$P_{\text{heat}} / 100 \text{ W}$   $T_{\text{set}} / ^\circ\text{C}$	Parameter für die Anpassung $T_{\text{R}} = a \cdot dP_{\text{pump}} + b$ , sortiert nach steigendem $T_{\text{R}}$							
	0   -20	0   -15	0   -10	3   -10	6   -10	2   20	3   20	5   20
$a / ^\circ\text{C bar}^{-1}$	1,8(2)	1,73(7)	1,3(2)	1,07(8)	1,1(1)	0,63(2)	0,6(-)	0,57(4)
$b / ^\circ\text{C}$	-16,6(7)	-11,9(1)	-7,2(5)	0,0(3)	8,6(4)	25,73(5)	29(-)	35,1(1)

### Im heat-up

$P_{\text{heat}} / 100 \text{ W}$   $T_{\text{set}} / ^\circ\text{C}$	Parameter für den Fit $T_{\text{fbk}} = a \cdot dP_{\text{pump}} + b$				Parameter für den Fit $T_{\text{R}} = a \cdot dP_{\text{pump}} + b$			
	3   -30	3   -20	6   -30	6   -20	3   -30	3   -20	6   -30	6   -20
$a / ^\circ\text{C bar}^{-1}$	0,0(2)	-0,1(1)	0,15(8)	0,4(3)	1,3(2)	1,3(1)	1,4(2)	1,5(2)
$b / ^\circ\text{C}$	-17,4(6)	-17,7(4)	-13,2(3)	-12,9(9)	-7,1(6)	-7,2(3)	4,7(8)	5,5(6)

Tabelle A.2: Die sich aus der linearen Anpassungen in Abbildung 5.2 und 5.3 ergebenden Anpassungsparameter im stabilen Kühlbereich und im heat-up, mit der Temperatur von SHT-0 exemplarisch für  $T_{\text{R}}$ . Es sei zu beachten, dass im stabilen Kühlbereich bei  $P_{\text{heat}} = 300 \text{ W}$  und  $T_{\text{set}} = \pm 10^\circ\text{C}$  20 °C nur zwei Datenpunkte für die Anpassung vorliegen, die Fehler der Parameter sind also unbestimmt. Für die Messungen mit  $T_{\text{fbk}}$  zeigt die Steigung  $a$  keine signifikante Abweichung zu Null, es gibt also keine eindeutige Abhängigkeit von  $T_{\text{fbk}}$  zu  $dP_{\text{pump}}$ . Es fällt auf, dass im heat-up bei gleichem  $P_{\text{heat}}$  aber unterschiedlichem  $T_{\text{set}}$  das Verhalten von  $T_{\text{R}}$  gegenüber  $dP_{\text{pump}}$  innerhalb der Fehler konsequent bleibt. Noch dazu lässt sich beobachten, dass im stabilen Kühlbereich mit steigendem  $T_{\text{set}}$   $a$  sinkt.

---

## Literatur

---

- [1] L. Evans und P. Bryant, *LHC Machine*, *Journal of Instrumentation* **3** (2008) S08001, URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08001> (siehe S. 2).
- [2] K. Aamodt u. a., *The ALICE experiment at the CERN LHC. A Large Ion Collider Experiment*, *JINST* **3** (2008) S08002, Also published by CERN Geneva in 2010, URL: <https://cds.cern.ch/record/1129812> (siehe S. 2).
- [3] G. Aad u. a., *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, *JINST* **3** (2008) S08003, Also published by CERN Geneva in 2010, URL: <https://cds.cern.ch/record/1129811> (siehe S. 2, 3).
- [4] S. Chatrchyan u. a., *The CMS experiment at the CERN LHC. The Compact Muon Solenoid experiment*, *JINST* **3** (2008) S08004, Also published by CERN Geneva in 2010, URL: <https://cds.cern.ch/record/1129810> (siehe S. 2).
- [5] A. A. Alves u. a., *The LHCb Detector at the LHC*, *JINST* **3** (2008) S08005, Also published by CERN Geneva in 2010, URL: <https://cds.cern.ch/record/1129809> (siehe S. 2).
- [6] P. Mouche, *Overall view of the LHC*, 2014, URL: <https://cds.cern.ch/record/1708847> (besucht am 09. 08. 2023) (siehe S. 2).
- [7] G. Aad u. a., *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, *Physics Letters B* **716** (2012) 1, ISSN: 0370-2693, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037026931200857X> (siehe S. 3).
- [8] J. Pequeno, *Computer generated image of the whole ATLAS detector*, 2008, URL: <https://cds.cern.ch/record/1095924> (besucht am 25. 07. 2023) (siehe S. 3).
- [9] S. Haywood, L. Rossi, R. Nickerson und A. Romaniouk, *ATLAS inner detector: Technical Design Report, 2*, Technical design report. ATLAS, CERN, 1997, URL: <https://cds.cern.ch/record/331064> (siehe S. 3).
- [10] M. Capeans u. a., *ATLAS Insertable B-Layer Technical Design Report*, Techn. Ber., 2010, URL: <https://cds.cern.ch/record/1291633> (siehe S. 3).
- [11] *Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Strip Detector*, Techn. Ber., CERN, 2017, URL: <https://cds.cern.ch/record/2257755> (siehe S. 4, 5).

- [12] J. Pequeno, *Computer generated image of the ATLAS inner detector*, 2008,  
URL: <https://cds.cern.ch/record/1095926> (besucht am 24. 07. 2023) (siehe S. 4).
- [13] Persönliche Gespräche mit M. Hamer (siehe S. 5).
- [14] CERN, *ITk Pixel Layout Updates*, 2020,  
URL: <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/ITK-2020-002/>  
(besucht am 24. 07. 2023) (siehe S. 5).
- [15] N. Klein, *Test und Inbetriebnahme eines Setups zur Qualitätskontrolle der ITk-Pixel Outer Barrel Bare Module Cell*, 2022 (siehe S. 5).
- [16] F. Munoz Sanchez, *Carbon based local supports for the ATLAS ITk-pixel detector*, Techn. Ber., CERN, 2023, URL: <https://cds.cern.ch/record/2847861> (siehe S. 5).
- [17] P. Barroca, *Modelling CO<sub>2</sub> cooling of the ATLAS ITk Pixel Detector*, Presented 30 Sep 2019, Diss., 2019, URL: <https://cds.cern.ch/record/2703341> (siehe S. 6–8).
- [18] B. Verlaat u. a., *The ATLAS IBL CO<sub>2</sub> cooling system*, *Journal of Instrumentation* **12** (2017) C02064,  
URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/02/C02064> (siehe S. 6, 8).
- [19] Persönliche Gespräche mit F. Hinterkeuser (siehe S. 7, 26).
- [20] B. Verlaat, M. Van Beuzekom und A. Van Lysebetten, *CO<sub>2</sub> cooling for HEP experiments*, (2008),  
URL: <https://cds.cern.ch/record/1158652> (siehe S. 7).
- [21] Persönliche Gespräche mit K. Padeken (siehe S. 9).
- [22] L. Zwalinski u. a., *First Steps in Automated Software Development Approach for LHC Phase II Upgrades CO<sub>2</sub> Detector Cooling Systems*, (2019) WEPHA170,  
URL: <https://cds.cern.ch/record/2771267> (siehe S. 9).
- [23] CERN, *Integrated CO<sub>2</sub> cooling system*,  
URL: <https://knowledgetransfer.web.cern.ch/technologies/integrated-co2-cooling-system> (besucht am 27. 07. 2023) (siehe S. 10).
- [24] R. Kantor und Ł. Klimczyk, *User's Manual for MARTA. A guide to operating the CO<sub>2</sub> Cooling Unit. Version: Enhanced + Local Box. Revision 1.0* (siehe S. 9, 14, 15).
- [25] T. Olchawski, *MARTA Monoblock Approach for a Refrigeration Technical Application*, 2017,  
URL: [https://indico.cern.ch/event/590227/contributions/2614149/attachments/1487980/2311754/MARTA\\_-\\_Monoblock\\_Approach\\_for\\_a\\_Refrigeration\\_Technical\\_Application.pdf](https://indico.cern.ch/event/590227/contributions/2614149/attachments/1487980/2311754/MARTA_-_Monoblock_Approach_for_a_Refrigeration_Technical_Application.pdf) (besucht am 22. 07. 2023) (siehe S. 10, 24, 27).
- [26] A. Rohatgi, *WebPlotDigitizer*,  
URL: <https://apps.automeris.io/wpd/> (besucht am 26. 07. 2023) (siehe S. 10).
- [27] ARCOL UK Limited, *HS Aluminium Housed Resistors*,  
URL: <https://www.tme.eu/Document/c285aad0d151871071d0cf452b1a9bc1/HS-10-05.45.pdf> (besucht am 22. 07. 2023) (siehe S. 16).
- [28] RHODE & SCHWARZ GmbH & Co. KG, *R&S<sup>®</sup> HMP Series Power Supplies Benutzerhandbuch*, Version 03 (siehe S. 16).

- [29] Arduino<sup>®</sup>, *Nano | Arduino Documentation*,  
URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano> (besucht am 13. 08. 2023) (siehe S. 16).
- [30] EPCOS AG, *NTC thermistors for temperature measurement*, 2013,  
URL: <https://www.farnell.com/datasheets/2006215.pdf> (besucht am 22. 07. 2023)  
(siehe S. 16).
- [31] Atmel Corporation, *ATmega328P*, 2015,  
URL: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf) (besucht am 15. 08. 2023)  
(siehe S. 16).
- [32] Eric O. LEBIGOT, *uncertainties*,  
URL: <https://pythonhosted.org/uncertainties/> (besucht am 10. 08. 2023) (siehe S. 17).
- [33] SENSIRION AG, *Datasheet SHT3x-DIS*, 2019, URL: [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Sensirion%20PDFs/HT\\_DS\\_SHT3x\\_DIS.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Sensirion%20PDFs/HT_DS_SHT3x_DIS.pdf) (besucht am 22. 07. 2023)  
(siehe S. 18, 19).
- [34] Silicon Lab Bonn, URL: <https://github.com/SiLab-Bonn/basil> (besucht am 04. 08. 2023)  
(siehe S. 20).
- [35] Silicon Lab Bonn,  
URL: [https://github.com/SiLab-Bonn/silab\\_collections](https://github.com/SiLab-Bonn/silab_collections) (besucht am 04. 08. 2023)  
(siehe S. 20).
- [36] The SciPy community, *SciPy documentation*,  
URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/> (besucht am 04. 08. 2023) (siehe S. 20).

---

# Abbildungsverzeichnis

---

2.1	Skizze des LHC mit der Lage der vier großen Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb. [6] . . . . .	2
2.2	Computergeneriertes Bild des ATLAS Detektors, mit Menschen als Maßstab. ATLAS besteht aus zahlreichen Magneten, Kalorimetern und Detektoren, die jeweils auf die Detektion unterschiedlicher Teilchen wie Photonen, Hadronen oder Myonen ausgelegt sind und deren Gesamtenergie, Impuls, sowie Ursprung ermitteln. Von besonderer Bedeutung ist jedoch der in rot markierte Inner Detector bestehend aus den Pixel-, SCT- und TRT-Detektoren. Bild modifiziert aus [8]. . . . .	3
2.3	Darstellung des aktuellen ATLAS Inner Detector, ohne IBL. In rot ist die Flugbahn eines Teilchens durch die diversen Detektoren eingezeichnet, wobei die TRT-Detektoren so angeordnet sind, dass mindestens 36 gasgefüllt Detektorröhren von dem Teilchen passiert werden. [12] . . . . .	4
2.4	Schematische Darstellung des Schnitts eines Quadranten des ITk-Detektors. In blau sind Streifendetektoren und in rot Pixeldetektoren dargestellt. Die Abszissenachse gleicht der Teilchenstrahlachse, mit dem Kollisionspunkt bei $z = 0$ mm. $r$ ist der radiale Abstand zur Strahlachse. [14] . . . . .	5
2.5	Schematische Darstellung des Schnitts eines Quadranten der ITk-Pixeldetektoren mit Aufteilung in Outer Barrel, Endcap und Inner System. Die Abszissenachse gleicht der Teilchenstrahlachse, mit dem Kollisionspunkt bei $z = 0$ mm. $r$ ist der radiale Abstand zur Strahlachse. Bild aus [15] entsprechend den Informationen aus [16], das ursprüngliche Bild ist in [14] zu finden. . . . .	5
3.1	Links: Skizze des Kühlsystemes für den aktuellen ATLAS ID (ohne IBL) mit $C_3F_8$ als Kältemittel. Rechts: Druck-Enthalpie-Phasendiagramm für den Kühlkreislauf. Grundlegend ist das Kältemittel am Sättigungspunkt, also kurz vor dem Verdampfen, bevor es in den Detektor fließt. Die Energieabgabe an das Kältemittel im Detektor ist im Phasendiagramm rot dargestellt. Das Kältemittel erwärmt sich dabei nicht, sondern die aufgenommene Energie erzeugt den Phasenübergang zum Gas. Das Heizelement nach dem Detektor (Heater) dient zur vollständigen Evaporation des Kältemittels. [20] . . .	7
3.2	Oben: Skizze des Kühlsystems mit Dummy Load für den IBL-Detektor und $CO_2$ als Kältemittel. Unten: Druck-Enthalpie-Phasendiagramm mit eingezeichneten Isothermen für den sekundären $CO_2$ Kühlkreislauf. Die Temperatur im Detektor kann mit dem Akkumulator reguliert werden und es bedarf keiner aktiven Elemente im Detektor. Bilder modifiziert aus [18] (oben) und [17] (unten). . . . .	8

3.3	Skizze eines CO <sub>2</sub> I-2PACL-Kühlsystems, wie es in MARTA verwendet wird. Der Akkumulator wird hier nicht extern, sondern von dem vom Chiller gekühlten CO <sub>2</sub> gekühlt. [23] . . . . .	10
3.4	Stabiler Kühlbereich des MARTA Prototypen bei einer CO <sub>2</sub> -Flussrate $q_{\text{CO}_2} = 2,6 \text{ g s}^{-1}$ . Es sind Datenpunkte für die maximal stabil kühlbare Heizlast $P_{\text{heat}}$ gegen die Setpointtemperatur $T_{\text{set}}$ aufgetragen. Die Daten sind aus [25], digitalisiert mit [26]. . . . .	10
4.1	Der gesamte Versuchsaufbau. Rechts außerhalb des Bildes ist der Rechner zur Datenerfassung. Auf MARTA steht die Local Box mit den Lastwiderständen sowie die Netzteile. Die Mikrocontroller zur Datenerfassung der Temperatursensoren liegen auf den Netzteilen.	12
4.2	Skizze des Versuchsaufbaus mit MARTA, Local Box und Stromversorgung (PSU), sowie Datenauslese. Flüssiges CO <sub>2</sub> aus MARTA gelangt über die innere Leitung der coaxialen Transfer Line zu der Local Box und kühlt die Widerstandsblöcke. Diese Blöcke und die Temperatursensoren an den Blöcken sind entgegen der CO <sub>2</sub> -Flussrichtung nummeriert. CO <sub>2</sub> in Biphase verlässt die Local Box durch MV6 und folgt der Transfer Line zurück zu MARTA. Das Zuflussventil MV5 vor dem Experiment ist ein fein einstellbares Dosierventil.	13
4.3	Die Local Box mit der im laufenden Betrieb von MARTA in Eis bedeckten CO <sub>2</sub> -Kühlleitung sowie die von Eis freien heizenden Lastwiderstände. In rot ist die CO <sub>2</sub> -Flussrichtung eingezeichnet und in blau ist das Ventil MV5 gekennzeichnet. . . . .	13
4.4	Berechnete Messungenauigkeit der Temperaturmessung des NTC ( $\Delta T$ ) in Abhängigkeit der Temperatur. Es ist die einfache Messungenauigkeit des NTC nach Gleichung 4.1 aufgetragen. Noch dazu ist auch die Messtoleranz der Temperaturmessung unter Beachtung der ADC Auflösung eingezeichnet, mit und ohne Mittlung der ADC Messwerte. Es ist zu sehen, dass somit die gesamte Messungenauigkeit für große und kleine Temperaturen des NTC, aufgrund des verwendeten Spannungsteilers, steigt. Die Berechnung der Messfehler folgt aus Gaußscher Fehlerfortpflanzung mit dem python Paket uncertainties [32]. . . . .	17
4.5	Kalibrierung des NTC-0, es ist die mit dem IR und PT manuell gemessene Temperatur der Widerstandsblöcke gegen die mit dem NTC gemessene Temperatur aufgetragen. Es fällt auf wie die neuen IR Daten nicht mehr zu der alten Kalibrierung passen. Die Anpassungsgerade wurde nur für die schwarz eingezeichneten IR-Daten durchgeführt, also ausgenommen sind rot markierte PT-Daten sowie IR-Daten beim Aufheizen der Widerstände. Die Fehler sind zur Übersicht nicht eingezeichnet. Die Kalibrierungen aller NTCs sind im Anhang in Abbildung A.1 zu finden. . . . .	17
4.6	Links: Der SHT-Sensor, in rot markiert, auf der Leiterplatinie, welche grob 1 cm <sup>2</sup> groß ist. Es sind gut die offenen Lötstellen zu erkennen, die durch Kondenswasser kurzgeschlossen werden können. Rechts: Die Rückseite der Leiterplatinie mit abgeklebten Kontakten. . . . .	18
4.7	Toleranz der Temperaturmessung $\Delta T$ des SHT-35 in Abhängigkeit der Temperatur [33] . . . . .	19

4.8	Überprüfung der Kalibrierung der SHT-Sensoren, es ist die mit dem IR gemessene Temperatur der Widerstandsblöcke gegen die mit den SHTs gemessene Temperatur aufgetragen. Die alten Daten sind aus den ersten Messungen mit SHT-1. Die neuen Daten sind von allen drei SHT-Sensoren rund sieben Wochen später. Es wurde eine lineare Anpassung mit allen Daten durchgeführt, die IR-Daten haben dabei einen Fehler von 1 °C. Das gemessene Offset von $(1,4 \pm 0,3)$ °C kann durch einen Versatz in dem ungeeichten Infrarotthermometer kommen oder durch die Tatsache, dass mit dem IR auf dem lackierten Kühlkörper der Widerstände gemessen werden musste, welcher wärmer als der Aluminiumblock mit dem SHT ist. Da aber die Steigung mit $(1,007 \pm 0,009)$ °C/°C nahe an 1 liegt, sind offensichtlich alle SHTs von Werk her gut kalibriert. Die Fehler wurden zur Übersicht nicht eingezeichnet. . . . .	19
4.9	Ein NTC- (links) und SHT-Sensor (rechts) auf einem der Widerstandsblöcke. Die Drahtbefestigung wurde teils durch Kabelbinder ersetzt, da diese für einen sichereren Halt sorgen. Beide Sensoren sind gegen Kondenswasser abgeklebt. Die NTCs wurden zusätzlich noch mit Klebeband gegen Zugluft abgedeckt. . . . .	20
5.1	Eine Messreihe bei $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$ und $T_{\text{set}} = -10$ °C. Es ist der zeitliche Verlauf der gemessenen Temperatur aller Temperatursensoren, sowie $T_{\text{fbk}}$ eingezeichnet. Auch ist die schrittweise Erhöhung von $P_{\text{heat}}$ sowie Änderungen an MV5 mit dem entsprechenden $dP_{\text{pump}}$ Werten vor- und nachher markiert. Es ist kein heat-up zu erkennen, da $T_{\text{fbk}}$ den Wert von $T_{\text{set}}$ selbst bei der maximalen Heizlast von 600 W halten konnte. Da mit Erhöhung von $P_{\text{heat}}$ auch $dP_{\text{pump}}$ anstieg, musste kurz vor 17 Uhr das Ventil MV5 ausreichend geöffnet werden, damit $dP_{\text{pump}}$ im weiteren Verlauf der Messung nicht über 5 bar steigt. Damit war auch eine Temperaturänderung am Experiment zu beobachten. Außerdem hat das Öffnen von MV5 um 16:54 Uhr mit rapidem Druckabfall eine kurze Diskontinuität in $T_{\text{fbk}}$ bewirkt. Fehler sind zur Übersicht nicht eingezeichnet. . . . .	22
5.2	Abhängigkeit der Temperatur an SHT-0 von $dP_{\text{pump}}$ ohne (a) und mit heat-up (b) bei unterschiedlichen Betriebsparametern. An den Punktgruppen wurden lineare Anpassungen durchgeführt, das Ergebnis der Anpassungen ist im Anhang in Tabelle A.2 zu finden. Es ist ein eindeutiger Abfall der Temperatur mit abnehmendem $dP_{\text{pump}}$ zu sehen. Außerdem bleibt im heat-up das Verhalten der Temperatur gegenüber $dP_{\text{pump}}$ bei gleichem $P_{\text{heat}}$ aber unterschiedlichem $T_{\text{set}}$ innerhalb der Anpassungsfehler konsequent. Zusätzlich fällt auf, dass im stabilen Kühlbereich mit steigendem $T_{\text{set}}$ , also steigendem Druck in der Kühlleitung, die Steigung der Anpassungsgeraden und damit die Abhängigkeit gegenüber $dP_{\text{pump}}$ abnimmt. Ein erhöhter absoluter Druck in der Kühlleitung sorgt also für eine stabilere, den Einstellungen von MV5 unabhängige Temperatur im Experiment. . . .	23
5.3	Es ist $T_{\text{fbk}}$ gegen $dP_{\text{pump}}$ bei unterschiedlichen Betriebsparametern im heat-up aufgetragen. An den Punktgruppen wurden lineare Anpassungen durchgeführt, das Ergebnis der Anpassungen ist im Anhang in Tabelle A.2 zu finden. Da die Steigung der Anpassungsgeraden innerhalb der Fehler nicht signifikant von Null abweicht, ist keine eindeutige Abhängigkeit von $T_{\text{fbk}}$ gegenüber $dP_{\text{pump}}$ zu erkennen. Die maximale Kühlleistung von MARTA ist also in erster Linie unabhängig von der Ventileinstellung MV5. . . . .	23

5.4	Stabiler Kühlbereich von MARTA bei $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$ . Methode-1 wurde bei konstantem $T_{\text{set}}$ gemessen, bis ein heat-up vorliegt. Bei Methode-2 wird im heat-up für unterschiedliche $P_{\text{heat}}$ das $T_{\text{fbk}}$ vermessen. Es ist zu sehen, dass Methode-1 und -2 übereinstimmende Ergebnisse liefern. Beim Plateau wurde das Maximum von $P_{\text{heat}}$ mit 600 W erreicht. Die Referenz bei $q_{\text{CO}_2} = 2,6 \text{ g s}^{-1}$ , beschrieben in Kapitel 3.3, ist aus [25]. . . . .	24
5.5	Stabiler Kühlbereich von MARTA bei $q_{\text{CO}_2} = 1,5 \text{ g s}^{-1}$ , vermessen nach Methode-2 mit mehreren Messreihen. Da der stabile Kühlbereich keinem linearen Verhalten folgt, wurde eine exponentielle Anpassung durchgeführt. Eine Messreihe wurde ausgenommen, da der primäre Kühlkreislauf von MARTA nur reduziert kühlte. Noch dazu konnte ab $P_{\text{heat}} > 360 \text{ W}$ aufgrund eines nicht ausreichenden Wärmekontakts zwischen Widerstand und Kühlleitung die maximale Kühlleistung nicht vermessen werden, eine Extrapolation ist jedoch eingezeichnet. . . . .	26
5.6	Stabiler Kühlbereich von MARTA bei unterschiedlichen $\text{CO}_2$ -Flussraten $q_{\text{CO}_2}$ , mit der Referenz aus [25]. Die maximale Kühlleistung steigt mit $q_{\text{CO}_2}$ . . . . .	27
A.1	Kalibrierung der NTCs, es ist die mit dem IR und PT manuell gemessene Temperatur der Widerstandsblöcke gegen die mit dem NTC gemessene Temperatur aufgetragen. Die Anpassungsgerade wurde nur für die schwarz eingezeichneten IR-Daten durchgeführt, also ausgenommen sind rot markierte PT-Daten sowie IR-Daten beim Aufheizen der Widerstände. Vor allem bei NTC-0 fällt auf, wie die neuen Daten nicht mehr zu der alten Kalibrierung passen. Die Fehler sind zur Übersicht nicht eingezeichnet. . . . .	30
A.2	Temperaturmessungen der Sensoren mit Anpassungskurven. Die Standardabweichungen der Temperaturmessung gegenüber der Anpassung sind in Tabelle A.1 zu finden. Die Messung in (a) wurde direkt nach dem ersten simplen Ankleben der NTCs mit Wärmeleitpaste und Klebeband an den Widerstandsblöcken bei Raumtemperatur aufgenommen. In Abbildung (b) sind die NTCs schon mit Kupferblechen befestigt und alle Sensoren wurden gegen Kurzschlüsse abgeklebt. Diese Messung ist bei einer anderen Raumtemperatur aufgenommen. In der letzten Messung in (d) sind die NTCs gegenüber der Messung in (c) mit Klebeband gegen Zugluft überklebt. Es fällt eine sichtbare Reduzierung der NTC Temperaturschwankungen auf, vor allem bei NTC-2 (oberster Graph). In diesen Messungen ist MARTA am aktiven kühlen der Heizlasten und es herrschen auch vergleichbare Bedingungen mit $T_{\text{set}} = -20 \text{ °C}$ und $q_{\text{CO}_2} = 3 \text{ g s}^{-1}$ . Die Heizlast wurde entsprechend in (c) von 200 W auf 250 W und dann auf 300 W erhöht und in (d) von 225 W auf 250 W und dann auf 275 W erhöht. Die exponentiellen Anpassungen haben einen Abstand von 10 s zu der Heizlastumstellung. . . . .	32

---

## Tabellenverzeichnis

---

4.1	Maximale und sichere Bereiche der Betriebsparameter von MARTA . . . . .	14
5.1	Werte für $T_{\min}$ bei unterschiedlichen Raumtemperaturen $T_1 = (22 \pm 1)^\circ\text{C}$ und $T_2 = (18 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Für 300 W und 600 W Heizlast liegen bei $T_1$ zwei Datenpunkte vor, die gemittelt wurden. Es ist zu erkennen, dass bei $T_2$ der Wert für $T_{\min}$ niedriger ist, im Schnitt um $(1,8 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ .	25
A.1	Standardabweichung $\Delta T$ der Temperaturmessung mit den unterschiedlichen Sensoren gegenüber einer Anpassungskurve nach den Messungen aus der Abbildung A.2. $N$ ist die Anzahl der Datenpunkte, die zum berechnen der Standardabweichung verwendet wurden. Es ist zu sehen, dass für die letzte Temperaturmessung (A.2(d)) die Standardabweichung aller Sensoren gleichmäßig bei rund $0,05^\circ\text{C}$ liegt. . . . .	33
A.2	Die sich aus der linearen Anpassungen in Abbildung 5.2 und 5.3 ergebenden Anpassungsparameter im stabilen Kühlbereich und im heat-up, mit der Temperatur von SHT-0 exemplarisch für $T_R$ . Es sei zu beachten, dass im stabilen Kühlbereich bei $P_{\text{heat}} = 300\text{ W}$ und $T_{\text{set}} = \pm 10^\circ\text{C}$ nur zwei Datenpunkte für die Anpassung vorliegen, die Fehler der Parameter sind also unbestimmt. Für die Messungen mit $T_{\text{fbk}}$ zeigt die Steigung $a$ keine signifikante Abweichung zu Null, es gibt also keine eindeutige Abhängigkeit von $T_{\text{fbk}}$ zu $dP_{\text{pump}}$ . Es fällt auf, dass im heat-up bei gleichem $P_{\text{heat}}$ aber unterschiedlichem $T_{\text{set}}$ das Verhalten von $T_R$ gegenüber $dP_{\text{pump}}$ innerhalb der Fehler konsequent bleibt. Noch dazu lässt sich beobachten, dass im stabilen Kühlbereich mit steigendem $T_{\text{set}}$ $a$ sinkt.	33

---

## Danksagung

---

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank an Prof. Dr. Klaus Desch für das Ermöglichen dieser Arbeit ausdrücken. Die Gelegenheit, dass ich tatsächlich an der länderübergreifenden Zusammenarbeit zum Umbau des ATLAS Experiments im LHC teilhaben konnte, hätte ich nie für möglich gehalten.

Ich bedanke mich auch bei Dr. Matthias Hamer für das ausführliche Beantworten meiner vielen Fragen zu Beginn der Arbeit sowie die schnelle Unterstützung zur Umsetzung des Versuchsaufbaus.

Ebenso möchte ich mich bei Dr. Florian Hinterkeuser für die Betreuung und stetige Hilfeleistung, aber insbesondere das unermüdliche Korrekturlesen dieser Arbeit bedanken.

Darüber hinaus danke ich Dr. Klaas Padeken für die netten abendlichen Diskussionen über Biphasenkühlsysteme, ohne die ich noch heute mit Recherchieren beschäftigt wäre.

Noch dazu möchte ich mich bei Wolfgang Dietsche und Susanne Zigann-Wack für das Vermitteln des nötigen Know-Hows und die vielen Tipps zur Versuchshardware bedanken.

Auch möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen bedanken, die mir nicht nur immer freundlich und schnell zur Hilfe standen, sondern auch viel Motivation gegeben haben.