Diplomarbeit

Aufbau einer Versuchseinrichtung und Messung zur Untersuchung der Vorgänge innerhalb einer Vollglasvitrine

vorgelegt am:	13.12.2024
von:	Julia Sophy Stenzel Böllberger Weg 27 06110 Halle (Saale)
Studiengang:	Versorgungs- und Umwelttechnik
Studienrichtung:	Kältetechnik
Seminargruppe:	GA-21
Matrikelnummer:	4004582
Praxispartner:	Arcadis Germany GmbH Am Leipziger Turm 7 06108 Halle (Saale)
Gutachter:	Dipl.-Ing. Dirk Erbarth (Arcadis)
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Lehr (Berufsakademie Glauchau)

Inhaltsverzeichnis

Danksagung ..... **III**
Abbildungsverzeichnis ..... **IV**
Tabellenverzeichnis ..... **VI**
Formelverzeichnis ..... **VII**
Glossar VIII
Abkürzungsverzeichnis ..... **IX**
1 Einleitung **1**
2 Vorbetrachtung **2**
3 Aufbau der Experimentiereinrichtung **5**
3.1 Messpunkte 7
3.2 Messmittel 9
4 Konstruktion Kühleinheit **11**
4.1 Schematischer Aufbau Kühleinheit 11
4.2 Fertigung Kühlmodul 13
4.3 Fertigung Gehäuse 17
4.4 Zusammenbau Kühleinheit 19
5 Konstruktion Umluftsystem **20**
5.1 Mechanische Umbauten 21
5.2 Zusammenbau Umluftsystem 24
6 Messwerterfassung **25**
6.1 Voruntersuchung Kühleinheit 25
6.2 Temperaturmessung an der Kühleinheit 27
6.3 Messung Strömungsgeschwindigkeit 34
7 Auswertung Messdaten und Fazit **37**
Quellenverzeichnis **40**
Abbildungsverzeichnis 40
Tabellenverzeichnis 40
Literaturverzeichnis 40
Ehrenwörtliche Erklärung **41**
Anlagenverzeichnis **42**

Danksagung

Zu Beginn meiner Diplomarbeit möchte ich meinen herzlichen Dank an all jene richten, die mich während dieser Zeit mit Rat und Tat unterstützt haben.

Allen voran geht mein Dank an meinen fachlichen Betreuer an der Berufsakademie, an Herrn Professor Dr.-Ing. Lehr. Zusammen konnten wir in verschiedenen Konsultationsterminen Probleme lösen und so erst ein Konzept und daraufhin einen experimentellen Aufbau mit verschiedenen Sonderlösungen errichten. Die bürokratischen Hürden auf dem Weg dorthin konnte ich mit Ihnen überwinden. Besonders möchte ich mich für die vielen Gespräche auch außerhalb des fachlichen bedanken.

Des Weiteren geht mein aufrichtiger Dank an Frau Professorin Dr.-Ing. habil Nickel und Herrn Professor Tiator. Sie beide unterstützen mich sowohl mit persönlichen Zusprüchen als auch mit Ihrer Hilfe im bürokratischen Hintergrund und ermöglichten mir einen großzügigen Zeitrahmen für diese Diplomarbeit.

Bei der praktischen Umsetzung meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei den Laboringenieuren bedanken. Herr Kästner unterstütze mich beim Bau der technischen Anlage, Herr Neumann baute mit mir zusammen die Kühleinheit und Herr Fischer half mir beim Druck des Prototypen. Bei Ihnen allen möchte ich mich für Ihre Zeit und Ihre fachliche Hilfe bedanken. Ohne diese wertvolle Unterstützung wäre es mir nicht möglich gewesen, meine Diplomarbeit in dieser Form zu erstellen.

Ich möchte meiner Familie meinen Dank aussprechen, die mich während der drei Jahre meines Studiums unterstützt und mir in schwierigen Zeiten Halt gegeben hat. Ebenso danke ich meinen Freunden, die mich tatkräftig unterstützt haben, insbesondere durch das Korrekturlesen meiner Arbeiten.

Als letztes möchte ich mich bei meinem Praxispartner der Arcadis Germany GmbH bedanken. Herr Nötzel und Herr Erbarth als meine direkten Ansprechpartner ermöglichten mir in vielerlei Hinsicht die Erstellung dieser Arbeit. In verschiedenen Gesprächen wurden sowohl Studien- also auch die Diplomarbeit kritisch bewertet und somit kontinuierlich verbessert. Insbesondere möchte ich mich bei Ihnen herzlich für die Freistellung bedanken, die mir einen entscheidenden Faktor verschaffte: Zeit. Dadurch war es mir möglich, die letzten offenen Punkte nachzuholen und konzentriert an beiden Arbeiten zu schreiben. Ebenso gilt mein Dank für das Mitfiebern meiner Kollegen, die mich auf diesem Weg begleitet haben.

Vielen Dank!

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Festlegung der Ausrichtung der Vitrine 5
Abbildung 2 Schematischer Aufbau PE (l.), Anschluss PE (r.) 6
Abbildung 3 Anschluss Peltier-Element 7
Abbildung 4 Messpunkteverteilung im Experiment 7
Abbildung 5 Referenzobjekt "Traumfänger" als Strömungsindikator 9
Abbildung 6 Schematischer Aufbau Kühlmodul mit Gehäuse 11
Abbildung 7 Kühlkörperblock (l.), aktueller Kühlkörper mit Axial-Lüfter (r.) 12
Abbildung 8 Controller QC-PC-CO-CH1 13
Abbildung 9 elektrische Verdrahtung Controller mit Reglerkomponenten 13
Abbildung 10 schematischer Aufbau PE mit Regler 14
Abbildung 11 Einbau Temperaturfühler (l.), Temperaturfühler (r.) 14
Abbildung 12 Benutzeroberfläche Software QC-SW-DPC-01 15
Abbildung 13 Einstellung Netzteile im maximal möglichen Betrieb 16
Abbildung 14 Austausch rechts gegen leistungsstärkeres Netzteil 17
Abbildung 15 Zusammenschluss Komponenten des Reglers 17
Abbildung 16 Druck der Teile im UltiMaker Drucker 18
Abbildung 17 Zusammengesetztes Gehäuse 18
Abbildung 18 Gehäuse mit Überbrückung durch Aluminiumplatten 19
Abbildung 19 Einbausituation Kühleinheit 19
Abbildung 20 schematischer Aufbau Umluftsystem 20
Abbildung 21 Seitenansicht Verteilerkasten 21
Abbildung 22 Ausschnitte Vitrine 22
Abbildung 23 Fertiger Innenausbau der Vitrine 23
Abbildung 24 Verschaltung Diode mit Ventilator (l.), realer Zusammenschluss (r.) ... 24
Abbildung 25 Abschluss Umbau 24
Abbildung 26 Testaufbau Regler und PE 25
Abbildung 27 Wärmebild Kühlkörper 26
Abbildung 28 Wärmebild Controller (rot Transistoren) 26
Abbildung 29 Anzeige im QC-SW-DPC-01 während des ersten Betriebs 27
Abbildung 30 Aufbau Messung der Temperatur an M1, M2 der Kühleinheit 27
Abbildung 31 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 1 an M1, M2 und Kontrollsensor 28
Abbildung 32 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 2 an M1, M2 und Kontrollsensor 30
Abbildung 33 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 3 an M1, M2 und Kontrollsensor 31
Abbildung 34 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 4 an M1, M2 und Kontrollsensor 32

Abbildung 35 Soll- und Ist-Temperatur nach Abschalten des Axiallüfters auf der kalten Seite 32
Abbildung 36 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 5 an M1, M2 und Kontrollsensor 33
Abbildung 37 Messung Strömungsgeschwindigkeit Abluft 34
Abbildung 38 Messung Strömungsgeschwindigkeit M4N 35
Abbildung 39 Messung Strömungsgeschwindigkeit M4S 35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zusammenfassung Kühllastberechnung 3
Tabelle 2 Zusammenhang der Begrifflichkeiten 6
Tabelle 3 Messwerte aus der Messung 1 an M1, M2, Kontrollsensor, Messfühler 29
Tabelle 4 Messwerte aus der Messung 2 an M1, M2, Kontrollsensor, Messfühler 30
Tabelle 5 Zusammenfassung Berechnung Volumenstrom 36

Formelverzeichnis

Formel 1 Berechnung Volumenstrom 36

Glossar

Begriff	Beschreibung / Erläuterung
$\dot{V}$	Formelzeichen Volumenstrom in m^3/h
c	Formelzeichen Geschwindigkeit in m/s
A	Formelzeichen Flächeninhalt in m^2

Abkürzungsverzeichnis

SMAC	Staatliches Museum für Archäologie Chemnitz
PE	Peltier-Element
Fan	Ventilator
CAD	Computer-Aided Design
PC	Personal Computer
TTL	Transistor-Transistor-Logik-Signal
NTC	negativer Temperaturkoeffizienten
l	links
r	rechts
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
s.	siehe
CPU	Central Processing Unit
DN	Nomineller Durchmesser – Nennweite
TEC	Thermoelectronic cooler – Peltier-Element
db(A)	Dezibel nach Frequenzbewertungskurve A
Temp.	Temperatur
min	Minuten

1 Einleitung

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war die Untersuchung der Machbarkeit der Kühlung einer Vitrine unterhalb der Umgebungstemperatur. Die vorherige Studienarbeit, welche die Grundlage dieser Diplomarbeit bildet, konzentrierte sich auf die Entwicklung eines technischen Entwurfs, um diese Aufgabe zu realisieren.

In der vorangegangenen Studienarbeit wurde untersucht, welche Kühlsysteme für die Aufgabenstellung geeignet wären. Ungeeignete Kältemaschinen wurden dabei begründet ausgeschlossen und letztlich wurde die Lösung mit einem Peltier-Element ausgewählt. Für die Realisierung wurde der Grundaufbau des Peltier-Elements mit Kühlkörpern bestimmt, und ein Gehäuse konzipiert, welches durch die additive Fertigung als Einzelanfertigung hergestellt wurde.

Die Entwurfsplanung beinhaltete den Aufbau eines Umluftsystems zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Kühlung der Vitrine. Aufgrund der Komplexität des Systems und der begrenzten Platzverhältnisse wurden spezielle Einzelanfertigungen für Komponenten entwickelt.

Diese Diplomarbeit dokumentiert detailliert die Realisierung und den Bau der Entwurfsplanung und behandelt die verschiedenen Herausforderungen, die dabei berücksichtigt werden mussten. Es wird dabei auf die praktischen Anforderungen und Anpassungen eingegangen, die notwendig waren, um die theoretische Planung in die Praxis umzusetzen. Damit wird eine erneute Bearbeitung dieses Themas durch Dritte ermöglicht.

Nach der Fertigstellung der technischen Anlage wurde deren Funktionalität im Hinblick auf die gestellten Anforderungen überprüft. In einer Reihe von Experimenten und Messungen wurde analysiert, ob das Konzept der Anlage den Anforderungen zur Kühlung von Exponaten entspricht und ob sie in der Lage ist, auf Veränderungen, wie beispielsweise Schwankungen von Randbedingungen, angemessen zu reagieren.

Diese Diplomarbeit richtet sich nicht nur an Fachleute im Bereich der Versorgungstechnik, sondern auch an Mitarbeitende von verschiedenen Einrichtungen wie dem SMAC in Chemnitz, die an der Entwicklung innovativer Lösungen für die Konditionierung von Vollglasvitrinen interessiert sind. Sie bietet eine fundierte Einführung in das Thema und erklärt zentrale Konzepte und Herausforderungen auf verständliche Weise.

2 Vorbetrachtung

Die Studienarbeit behandelt eine Entwurfsplanung für die Konditionierung von Vollglasvitrinen zur Ausstellung empfindlicher archäologischer Objekte. Sie wurde in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Museum für Archäologie Chemnitz (SMAC) als Leihgeber der Vitrine durchgeführt. Ziel der Arbeit ist es, optimale Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen zu gewährleisten, um die Integrität der Exponate zu erhalten, während die technische Integration unauffällig bleibt. Die Entwurfsplanung zeigte, dass das entwickelte Konzept theoretisch den Anforderungen an die Klimatisierung empfindlicher Exponate gerecht werden könnte.

In der Studienarbeit wurden Begrenzungen und Festlegungen getroffen, um eine vollständige Entwurfsplanung erstellen zu können. Diese Festlegungen und die Planung sollen in diesem Kapitel auf ihren aktuellen Stand hin überprüft werden.

Die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchte wurden komplementär zu den Raumklimawerten im Museum als konstant betrachtet, um so einen „Normzustand“ zu definieren. So wird weiterhin für den umgebenden Raum eine konstante Raumtemperatur von 21°C und einer relativen Luftfeuchte von 50 Prozent angenommen. Eventuell auftretende externe thermische Wärmelasten wurden in der Berechnung und in der Durchführung dieser Experimente im Normzustand nicht berücksichtigt.

Die simulierte Ausstellung des Referenzexponat für beide Arbeiten war die so genannte „sibirische Eisprinzessin“. Eine Trockenmumie, welche zu den biologischen Exponaten zählt. Als solches ist eine Lagerung bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 Prozent erforderlich. Die Zieltemperatur innerhalb der Vitrine ist bei 16-18°C festgesetzt, wobei die Temperaturen jeweils die Extremwerte abbilden, da selbst geringfügige Änderungen Auswirkungen auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft haben. Die Zulufttemperatur soll 17°C mit einer Regelgüte von +/- einem Kelvin betragen. Schwankungen dieser Werte könnten beispielsweise zu Schimmel- oder Bakterienbildung führen, was das Referenzexponat erheblich beschädigen oder im schlimmsten Fall zerstören könnte.

Besondere Herausforderungen lagen in der Einhaltung der vorgegebenen Randbedingungen sowie in der Integration der technischen Anlagenkomponenten, welche dem Betrachter weites gehend verborgen bleiben sollte.

Das Untersuchungsobjekt wurde vom Staatlichen Museum für Archäologie Chemnitz (SMAC) zur Verfügung gestellt. Die Wahl fiel dabei auf eine Tischvitrine, da diese ein größeres Platzangebot bietet, um die Anlagentechnik im Untertischbereich unterzubringen (die Bemaßung der Tischvitrine ist der Anlage 2.1 zu entnehmen).

Die geplanten Umbauten umfassten Änderungen an der Objekttischplatte und die Integration eines Umluftsystems, ohne das äußere Erscheinungsbild erheblich zu verändern.

Die notwendigen Umbaumaßnahmen wie einiger Zuschnitte und das Entfernen von Komponenten wurde vom Museum vollständig genehmigt (s. Anlage 1.1). Beim Umbau wurde darauf geachtet, dass die vorhandene Beleuchtungstechnik nicht beschädigt wird.

Die Grundlage für die Auswahl und Dimensionierung der Anlagenkomponenten bildete die Berechnung der Kühllast. Bei der Ermittlung wurden mehrere Faktoren analysiert und begründet in die Berechnung aufgenommen oder ausgeschlossen. So wurde die Kühllast über den Wärmestrom durch die Umgrenzungsflächen, den Wärmestrom der Beleuchtung und des Ventilators ermittelt. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Tabelle 1 zusammengefasst:

Bauteil	Tischvitrine Volumen: 0,289 m³	
$\dot{Q}_{Nord\ \&\ Süd}$	1,86	W
$\dot{Q}_{Ost\ \&\ West}$	2,76	W
$\dot{Q}_{Decke}$	2,43	W
$\dot{Q}_{Boden}$	1,59	W
$\dot{Q}_{Licht}$	28	W
$\dot{Q}_{Fan}$	7,5	W
$\boldsymbol{\sum \dot{Q}_{Gesamt}}$	**44,14**	**W**

Tabelle 1 Zusammenfassung Kühllastberechnung

Die technischen Lösungen der Studienarbeit umfassten den Vergleich zweier Kühlsysteme: Kompressionskältemaschinen und Peltier-Elemente. Aufgrund der geringen benötigten Leistung von 50 Watt und wirtschaftlicher Überlegungen fiel die Wahl auf Peltier-Elemente. Diese bieten eine kompakte, leise und kosteneffiziente Lösung, die im Rahmen dieser Diplomarbeit experimentell getestet werden. Die Entscheidung für Peltier-Elemente wurde zudem durch ihre hohe Regelbarkeit aus, insbesondere im Hinblick auf das geringe zu kühlende Volumen innerhalb der Vitrine.

Trotz einiger Änderungen während der Errichtung der technischen Anlage blieben die 50 Watt Leistung unverändert. Das eingesetzte Peltier-Element verfügt über eine Leistung von 72 Watt, was darauf zurückzuführen ist, dass dieses Modell an der Berufsakademie vorrätig war.

Mit Hilfe des Gesamtwärmestroms aus der Kühllastberechnung konnte der erforderliche Volumenstrom für das Umluftsystem ermittelt werden. Die weitere Auslegung der Anlagenkomponenten erfolgte unter Berücksichtigung des technisch sinnvoll aufgerundeten Volumenstroms von 70 m^3/h (Berücksichtigung der Leistungsabweichungen der technischen Anlagenkomponenten).

Die Entwurfsplanung umfasste eine detaillierte Bestellliste, auf deren Grundlage die jeweiligen Komponenten beschafft wurden. Komponenten, die bereits vorhanden waren, wurden von der Berufsakademie bereitgestellt. Dazu zählen der Regler, die Netzteile, Kühlkörperblöcke, Kühlkörper mit Axiallüfter für die kalte Seite, Messmittel, Werkzeuge und das Peltier-Element.

Abschließend ist zu vermerken, dass der in der Studienarbeit definierte Normzustand geringfügig von dem in dieser Arbeit Verwendeten abweicht. Während des Umbaus der Vitrine wurde festgestellt, dass die vorhandene Beleuchtung nicht ohne Beschädigungen aus- und wieder eingebaut werden kann. Daher wurde die Beleuchtung zusammen mit der Objekttischplatte nicht berücksichtigt und blieb unverändert. Aus diesem Grund ist die Beleuchtung im aktuellen Normzustand nicht mehr vorhanden. Die Berechnung und Auslegung der technischen Komponenten wurden dadurch nicht beeinflusst. Es wird angenommen, dass die geringe Leistung der Beleuchtung keinen wesentlichen Einfluss auf die Kühlung der Vitrine ausübt und daher vernachlässigt werden kann.

3 Aufbau der Experimentiereinrichtung

Aufgrund der Komplexität des Vorhabens wurde eine Splittung der Experimente in zwei Schritten beschlossen. Als erstes wurde die Kühleinheit auf ihre Funktionalität nach der entsprechenden Entwurfsplanung geprüft. Gleichzeitig wurde das Umluftsystem errichtet. Im Folgenden werden Festlegungen für die Experimentplanung beschrieben.

- Vitrine

Um die Komponenten der technischen Anlage und die Messpunkte im Aufbau korrekt und gleichbleibend zuordnen zu können, wurde die Vitrine in Himmelsrichtungen eingeteilt. Die Abbildung 1 zeigt die Einteilung mit der Maßgabe, dass Süden an der Schließvorrichtung (Schlüsselsymbol) der Vitrine definiert ist. Die Blickrichtung / der Standpunkt vor der Vitrine ist dabei immer von Süden in nördliche Richtung.

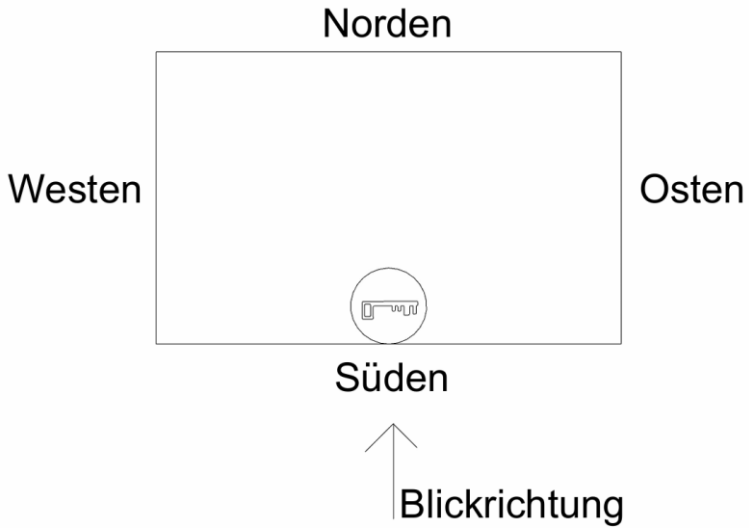

Abbildung 1 Festlegung der Ausrichtung der Vitrine

- Kühleinheit

Ein Peltier-Element ist ein thermoelektrisches Bauteil, das auf dem Peltier-Effekt basiert. Es besteht aus zwei verschiedenen Halbleitermaterialien, die in Reihe geschaltet sind und an ihren Kontaktstellen thermisch verbunden sind (Abbildung 2). Wenn elektrische Energie durch das Peltier-Element geleitet wird, erzeugt es einen thermischen Wärmefluss, der eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten des Elements bewirkt. Sobald eine Seite des Peltier-Elements eine dominante Wärmekapazität erreicht, wird die Temperatur der anderen Seite primär durch die Temperaturdifferenz beeinflusst. Das bedeutet, dass die thermische Reaktion auf der Seite mit geringerer Wärmekapazität hauptsächlich von der Temperaturänderung der anderen Seite abhängt. Somit kühlt sich eine Seite ab (absorbiert Wärme), während die andere Seite sich erhitz (gibt Wärme ab). [2],[3]

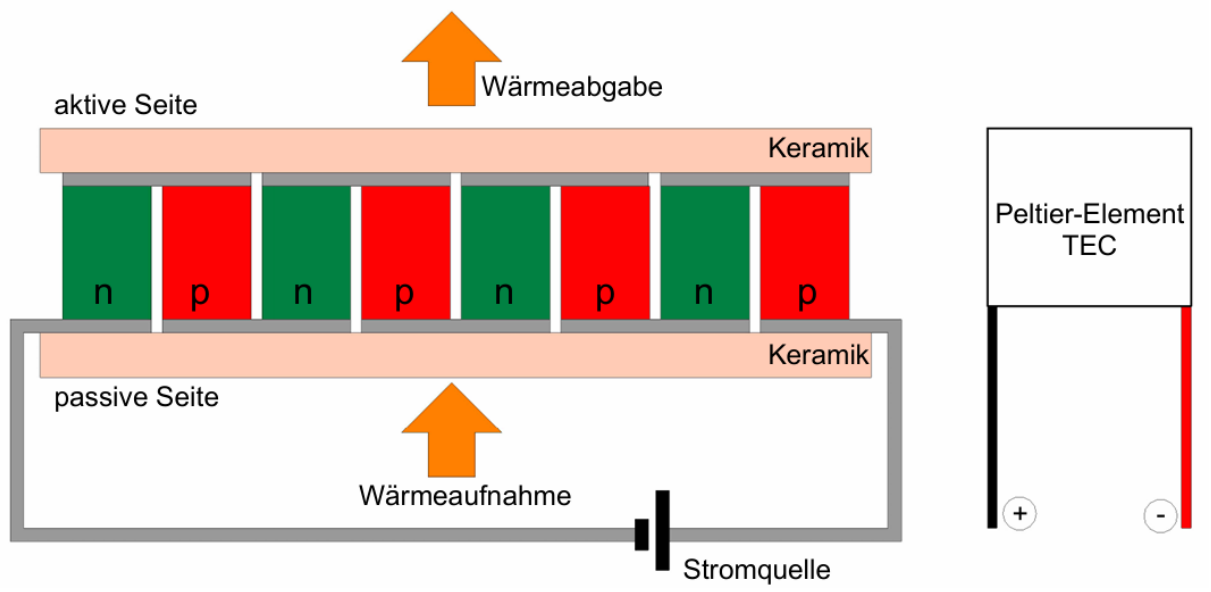

Abbildung 2 Schematischer Aufbau PE (l.), Anschluss PE (r.)

Der Aufbau des Peltier-Elementes mit den Kühlkörpern und dem dazugehörigen Regler ist komplex gestaltet. Die größte Herausforderung bestand in der Trennung der „warmen“ und „kalten“ Seite. Manchmal wird auch von einer „passiven“ und einer „aktiven“ Seite gesprochen, insbesondere in der technischen Beschreibung des Einbaus in Systeme:

- Aktive Seite: Die Seite, die gekühlt wird, und auf der die Absenkung der Temperatur durch den Stromfluss direkt genutzt wird.
- Passive Seite**:** Die Seite, die Wärme abgibt und über externe Maßnahmen (z. B. Kühlkörper oder Ventilatoren) gekühlt werden muss, um die Effizienz des Systems zu gewährleisten.

Die Tabelle 2 verdeutlicht den Zusammenhang der Begrifflichkeiten. Im Folgenden werden nur noch die Begriffe der warmen und kalten Seite des Peltier-Elements verwendet.

Thermischer Begriff	Fachliche Bezeichnung	Position im Aufbau
Warme Seite	Aktive Seite	Außerhalb des Gehäuses
Kalte Seite	Passive Seite	Innerhalb des Gehäuses

Tabelle 2 Zusammenhang der Begrifflichkeiten

Die fachlichen Bezeichnungen sind je nach Anwendungsfall (kühlen oder heizen) zu vergeben. Dementsprechend wurden diese, wie oben genannt, festgelegt. Da ein Peltier-Element je nach Stromrichtung bzw. je nach Anschluss an den Minus- und Pluspol auf der aktiven Seite kalt oder warm wird, wurde im ersten Versuch das PE frei von weiteren Komponenten wie in der folgenden Abbildung 3 angeschlossen. Somit ist für den weiteren Aufbau der Anschluss an die Pole festgelegt worden.

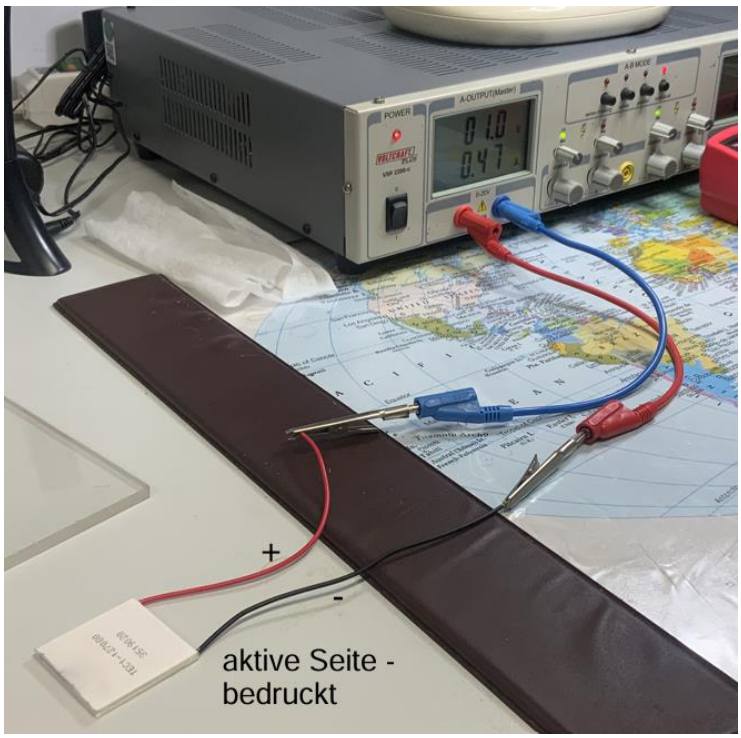

Abbildung 3 Anschluss Peltier-Element

3.1 Messpunkte

Das folgende Kapitel beschreibt die im Experiment an der technischen Anlage vorgesehenen Messpunkte. Während der Experimentplanung war festzulegen, wo die einzelnen Messdaten abgenommen werden sollen. Die folgende Abbildung 4 zeigt schematisch die Aufteilung:

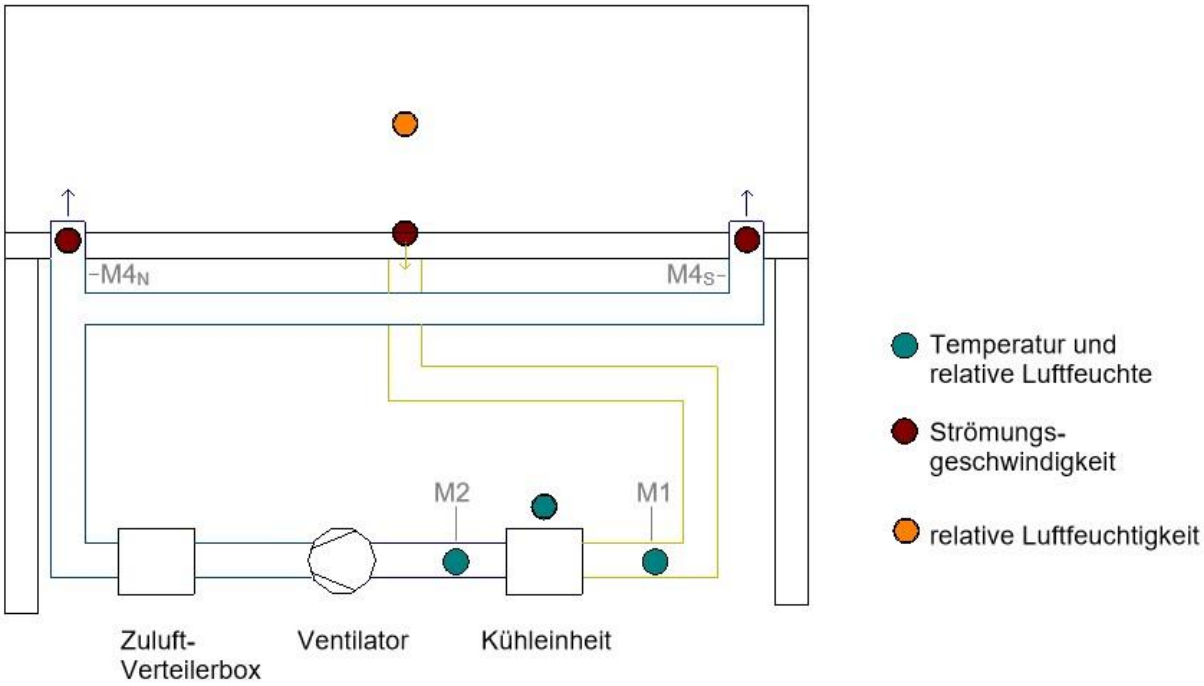

Abbildung 4 Messpunkteverteilung im Experiment

Ersichtlich werden hierbei die relevanten Messgrößen: Temperatur und relative Luftfeuchte, die Strömungsgeschwindigkeit der Luft. Die einzelnen Messpunkte wurden mit einem „M“ abgekürzt und zum besseren Verständnis durchnummeriert. Die Nummerierung ist historisch gewachsen und konnte im Verlauf nicht mehr geändert werden. Einige der Messungen sind entfallen, jedoch die Bezeichnung blieb dieselbe. Die Abbildung 4 ist schematisch und nicht mit der festgelegten Ausrichtung der Vitrine zusammen zu verstehen.

- Temperatur und relative Luftfeuchte

Diese beiden Messgrößen sind die erforderlichen Zielgrößen in dieser Untersuchung. Für jedes Exponat werden die Lagerungsbedingungen von Restauratoren und Kuratoren festgelegt. Die erforderlichen Angaben sind in Kapitel 2 festgehalten.

Die erste Messung M1 im Umluftsystem wurde am Abluftrohr durchgeführt, um die Einhaltung der vorgegebenen Maximalwerte zu überprüfen (Temperatur 18 °C, relative Luftfeuchtigkeit 50 Prozent).

Die zweite Messung M2 erfolgte nach der Kühleinheit, als Kontrollmesspunkt. Innerhalb der Kühleinheit wurde die Temperatur durch den Temperaturfühler des Reglers erfasst (schematischer Aufbau s. Anlage 2.2). Durch diese Messung wurde sowohl die Funktionalität des Reglers überprüft als auch die tatsächliche Temperatur des Volumenstroms erfasst. Die Messungen M1 und M2 wurden sowohl einzeln, zur Analyse der Kühleinheit, als auch im Verbund mit dem gesamten System mehrfach durchgeführt.

- Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Vitrine darf nicht mehr als ein Meter pro Sekunde betragen. Diese Festlegung wurde in der Studienarbeit getroffen und ist als Zielgröße zu verstehen, welche mindestens erreicht werden muss. Einige Exponate sind sehr empfindlich und könnten durch Luftbewegungen beschädigt werden. Ebenfalls sollen die Exponate für das Auge des Besuchers unbewegt bleiben. Hierfür bräuchte es eine laminare Quelllüftung mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,1 bis 0,2 Meter pro Sekunde.

Die Strömungsgeschwindigkeit wurde an den Zuluftkästen ($M4_S$ und $M4_N$) sowie direkt am Abluftstutzen gemessen. Ziel dieser Messungen war es, zu überprüfen, ob eine gleichmäßige Quelllüftung gewährleistet ist.

Zur sensorischen Messung der Strömungsverteilung wurde die Verteilung der Luft durch die Zugabe von Nebel visualisiert, wobei diese mit einer Video-Dokumentation aufgezeichnet wurde. Dabei wurde gemessen, wie lange es dauert, den durch den Nebel dargestellten Wärmestau in der Vitrine abzuleiten, um die Effektivität der Luftzirkulation und die Leistung des Umluftsystems zu beurteilen.

Diese Methode ermöglichte es, die Dynamik der Luftbewegung innerhalb der Vitrine visuell und zeitlich nachvollziehbar zu analysieren.

Zusätzlich wurde als bewegliches Referenzobjekt ein „Traumfänger“ mit Federn als Strömungsindikator in der Vitrine aufgehangen (Abbildung 5), um eine visuelle Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit zu ermöglichen.

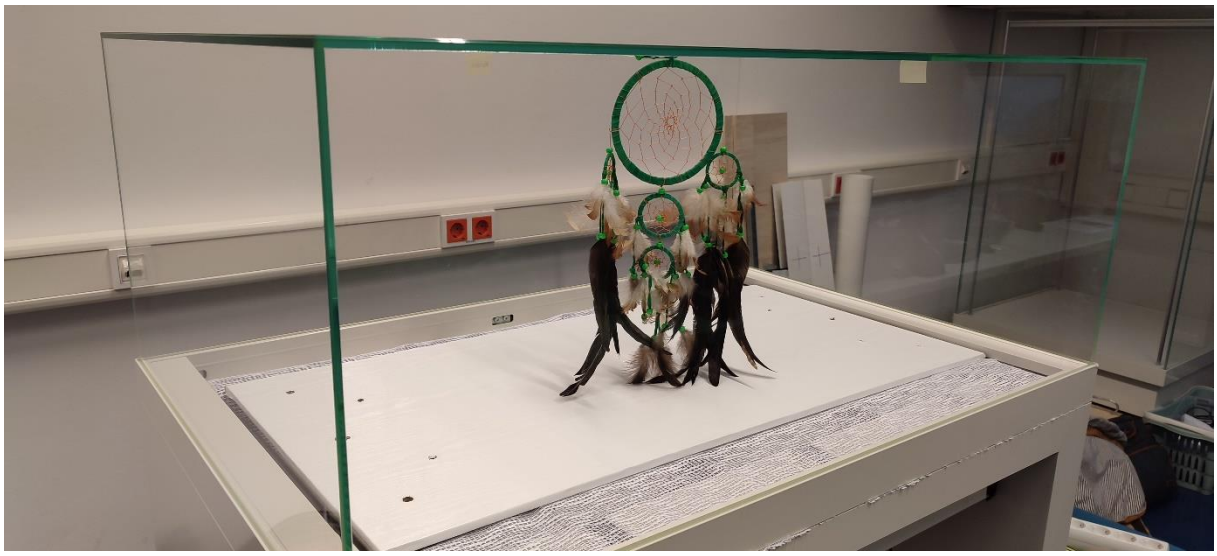

Abbildung 5 Referenzobjekt "Traumfänger" als Strömungsindikator

3.2 Messmittel

Zur Bewertung der Klimatisierung wurden in der Studienarbeit verschiedene Messmethoden konzipiert beschrieben. Diese konzentrieren sich auf Parameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Volumenstrom und Schallpegel, um die Funktionsweise der technischen Anlage zu überprüfen.

Während der Messungen wurden Temperaturfühler des Typs Pt100 eingesetzt, die sich durch ihre hohe Messgenauigkeit auszeichnen. Diese Fühler arbeiten auf Basis eines Widerstands, der sich proportional zur Temperatur verändert, und ermöglichen eine präzise Erfassung der Temperatur mit einer typischen Messabweichung von ±0,15 °C bei Klasse A-Sensoren. Pt100-Fühler eignen sich besonders für Anwendungen, bei denen exakte Messungen erforderlich sind, wie in der Klimatisierung von Vitrinen. Ihre Zuverlässigkeit und Genauigkeit machen sie zu einem bevorzugten Standard in der Temperaturmessung.

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wurde ein Anemometer eingesetzt, das speziell für niedrige Geschwindigkeitsbereiche von 0,01 bis 1 Meter pro Sekunde ausgelegt ist. Dieses Messgerät ermöglicht eine präzise Erfassung der Luftströmung und eignet sich ideal für Anwendungen, bei denen eine genaue Überprüfung von langsamen Strömungen, wie sie im Umluftsystem der Vitrine auftreten, erforderlich ist. Die hohe Empfindlichkeit des Anemometers gewährleistet zuverlässige Ergebnisse auch bei minimalen Luftbewegungen.

Für die direkte Messung des Volumenstroms stand ein Staurohrmessgerät zur Verfügung, das jedoch aufgrund seiner Eigenschaften nicht für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich geeignet war.

Für die Erfassung und Aufzeichnung der Messungen wurde der Messcomputer von Ahlborn, Modell V7, eingesetzt. Das Gerät bietet neun Steckplätze, die eine gleichzeitige Aufnahme mehrerer Messgrößen ermöglichen, wodurch umfangreiche Daten effizient erfasst werden können. Der Messcomputer zeichnet sich durch seine hohe Präzision und Flexibilität aus und ist mit verschiedenen Sensoren kompatibel, darunter Temperatur-, Feuchte- und Strömungssensoren. Zudem ermöglicht die integrierte Software eine einfache Kalibrierung und Auswertung der Messdaten. Dieses Modell ist speziell für anspruchsvolle Anwendungen in Laborumgebungen ausgelegt und eignet sich ideal für umfassende Analysen.

Die Aufzeichnung und Ausgabe der Messdaten wurden mithilfe der AMR WinControl-Software durchgeführt. Zur Datenübertragung musste das WLAN-Modul des Messcomputers V7 mit dem Computer verbunden werden. Diese Software ermöglicht eine präzise Echtzeit-Erfassung der Messdaten sowie deren direkte Analyse und Visualisierung.

4 Konstruktion Kühleinheit

In der Studienarbeit wurden verschiedene Möglichkeiten zur Gestaltung der Kühleinheit untersucht. Dies umfasst die technischen Komponenten zur Kühlung der Luft und das Gehäuse. Das folgende Kapitel behandelt die spezifischen Merkmale der Fertigung und des Zusammenbaus des Kühlmoduls sowie des Reglers hin zur fertigen Kühleinheit.

4.1 Schematischer Aufbau Kühleinheit

Für den experimentellen Aufbau des Erstversuchs wurde ein Peltier-Element in Kombination mit Kühlkörpern (kurz Kühlmodul) ausgewählt. Die Abbildung 6 veranschaulicht den initialen schematischen Aufbau:

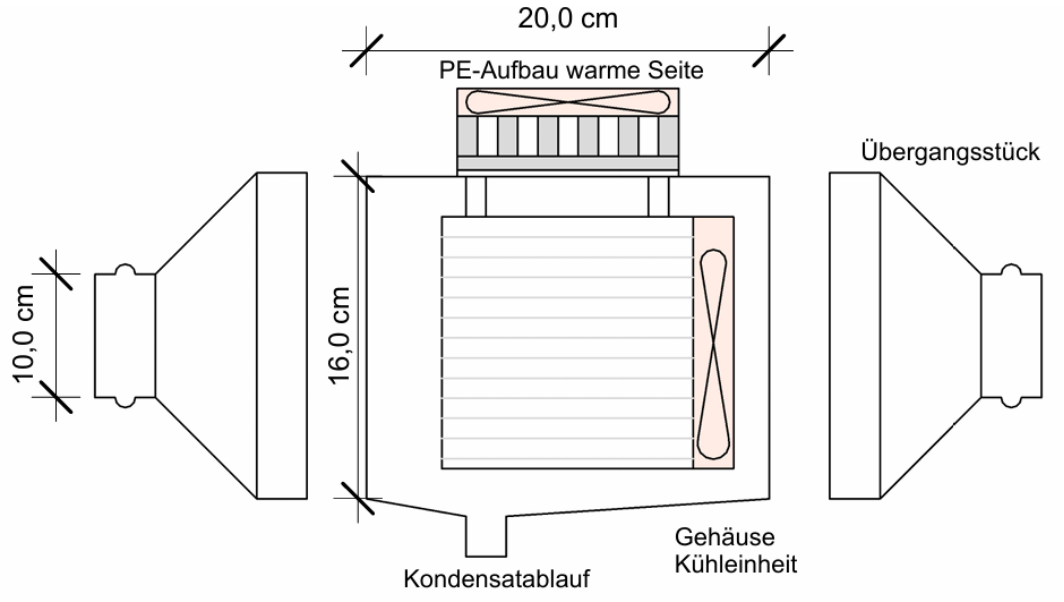

Abbildung 6 Schematischer Aufbau Kühlmodul mit Gehäuse

Der Aufbau der Kühleinheit gliedert sich in zwei Hauptkomponenten und besteht aus dem Kühlmodul und dem Gehäuse.

- Kühlmodul

Zunächst wurde in der Entwurfsplanung das Kühlmodul betrachtet, welches auf beiden Seiten mit Kühlkörpern ausgestattet ist. Diese Kühlkörper vergrößern die Oberfläche und verbessern somit den Wärmeübergang, indem sie die Kontaktfläche zwischen dem Kühlmedium und dem zu kühlenden Objekt erhöhen.

Auf der kalten Seite ist ein Kühlkörper mit Heatsink und einem integrierten Axiallüfter vorgesehen, der den Luftstrom über die Lamellen des Kühlkörpers leitet, um einen effizienten Wärmetransport zu gewährleisten.

Die aktive Seite des Peltier-Elements ist ebenfalls mit einem Kühlkörper ausgestattet, um die entstehende thermische Wärme abzuleiten. Der Kühlkörper war entsprechend der ersten Planung ein Aluminiumblock mit Kühlrippen (Abbildung 7 links). Jedoch konnte in den ersten Experimenten schnell erkannt werden, dass dieser für eine ausreichende Wärmeabfuhr nicht geeignet ist. Somit wurde der Kühlkörper, ähnlich der kalten Seite, durch ein größeres Modell mit Lamellen, Heatsink und Axiallüfter ausgetauscht (Abbildung 7 rechts)

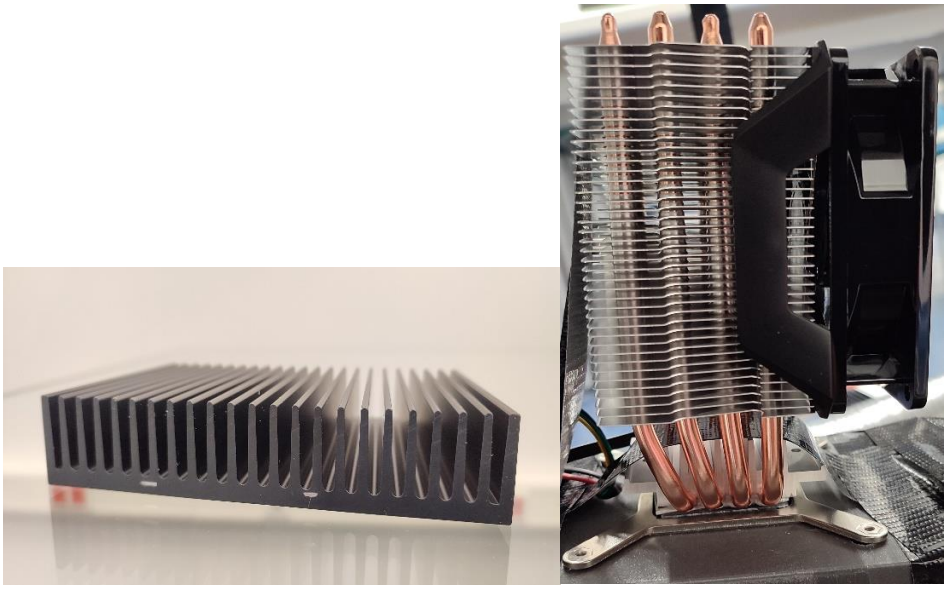

Abbildung 7 Kühlkörperblock (l.), aktueller Kühlkörper mit Axial-Lüfter (r.)

Bei diesem Aufbau des Kühlmoduls besteht die Herausforderung darin, die kalte und warme Seite so zu isolieren, dass die im Betrieb entstehende Wärme der warmen Seite effizient abgeführt wird, ohne die kalte Seite zu beeinflussen oder zu erwärmen.

- Gehäuse

Die zweite Hauptkomponente der Kühleinheit ist das Gehäuse, das in seiner baulichen Ausführung spezifische Besonderheiten aufweist. Durch die thermische Abkühlung der Luft fällt Kondensat aus, welches abgeführt werden muss. Dafür wurde ein Kondensatablauf vorgesehen.

Das entstehende Kondensat sollte nicht auf den Lamellen des Kühlkörpers auf der passiven Seite verbleiben, da dies den Wärmeübergang vom Kühlkörper auf die Luft beeinträchtigen und dessen Effizienz verringern würde. Stehendes Kondensat könnte zudem den Kühlkörper oder den daran befestigten Axiallüfter beschädigen.

Das Gehäuse wurde so konstruiert, dass das Kühlmodul mit einer Neigung von 10° eingebaut werden kann. Diese Neigung basiert auf der Tatsache, dass Wasser ab einer Neigung von 3° (sicherer Wert) zu fließen beginnt. Mit der vorgesehenen Neigung wird zusätzlich ein Sicherheitsaspekt berücksichtigt.

4.2 Fertigung Kühlmodul

Für die Steuerung des Peltier-Elements wird ein Regler benötigt. Hierfür wurde der Controller vom Hersteller Quick-Ohm ausgewählt. Das Modell QC-PC-CO-CH1 (Abbildung 8) ist ein Temperaturregler, der das Peltier-Element bidirektional ansteuert, wodurch sowohl Kühl- als auch Heizfunktionen ermöglicht werden. Spezifisch dieses Modell wurde verwendet, da dies an der BA vorrätig war. Die Heizfunktion wird in diesem Anwendungsfall nicht benötigt. Mit dem Regler kann die Zieltemperatur im Bereich von -40°C bis 100°C eingestellt werden. Zur besseren Verständlichkeit wird dieses spezifische Bauteil als *Controller* bezeichnet, während der gesamte Aufbau im Folgenden als *Regler* definiert wird.

- Controller

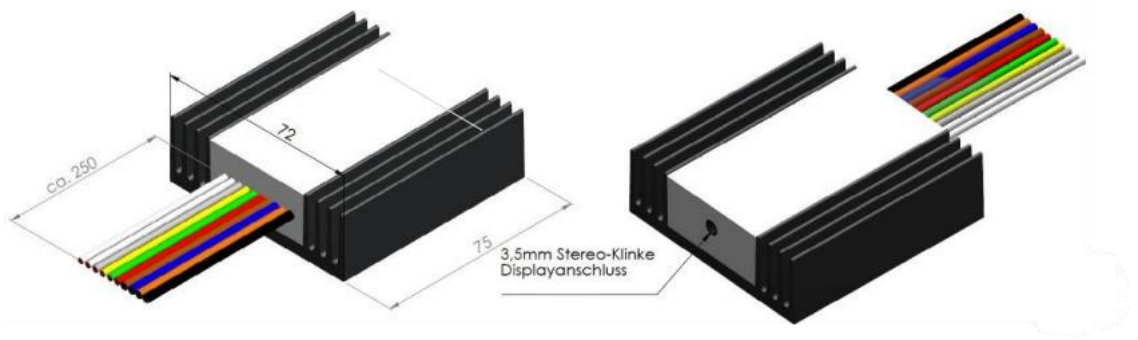

Abbildung 8 Controller QC-PC-CO-CH1

Der Controller wird mit einer Kleinspannung von 12 VDC bis 24 VDC betrieben und darf nicht an eine Netzspannung von 230 Volt angeschlossen werden. Für den Aufbau einer funktionalen Regelung ist eine korrekte elektrische Verdrahtung (Abbildung 9) erforderlich.

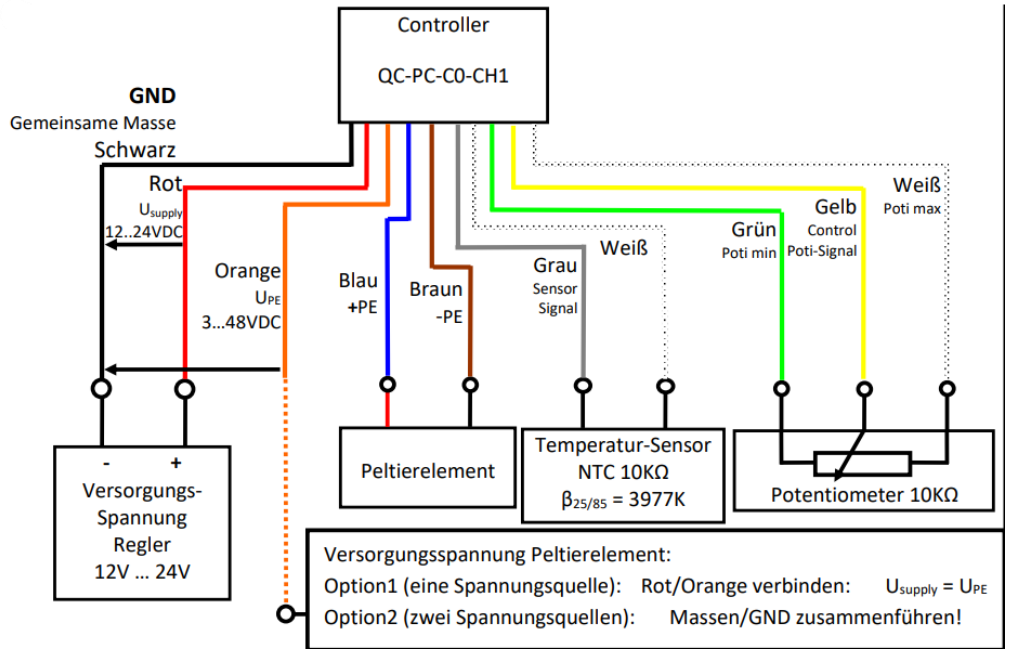

Abbildung 9 elektrische Verdrahtung Controller mit Reglerkomponenten

Aufgrund der integrierten Technik, einschließlich zweier Transformatoren, ist anzunehmen, dass sich der Controller während des Betriebs erwärmt. Um die entstehende Wärme effektiv abzuführen, wird der Controller auf einem Kühlkörperblock platziert.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Temperierung mittels eines Peltier-Elements ist ein korrekt konzipierter thermischer Aufbau. Daher wurde zunächst analysiert, wie die einzelnen Komponenten miteinander verbunden werden müssen. Die Abbildung 10 (Anlage 2.3) veranschaulicht den schematischen Aufbau des Peltier-Elements in Verbindung mit dem angeschlossenen Regler.

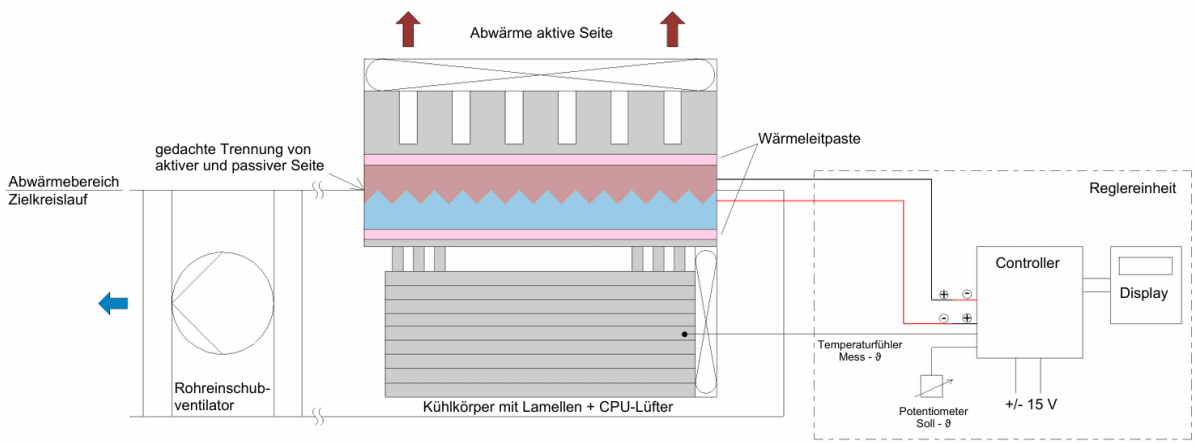

Abbildung 10 schematischer Aufbau PE mit Regler

- Temperaturfühler

Der Temperaturfühler des Reglers wurde, umgeben von Wärmeleitpaste, zwischen die Lamellen des Kühlkörpers auf der kalten Seite eingeführt (Abbildung 11). Dies ermöglicht die Erfassung der tatsächlichen Temperatur des Kühlkörpers, die ausschlaggebend für die Luftstromkühlung ist.

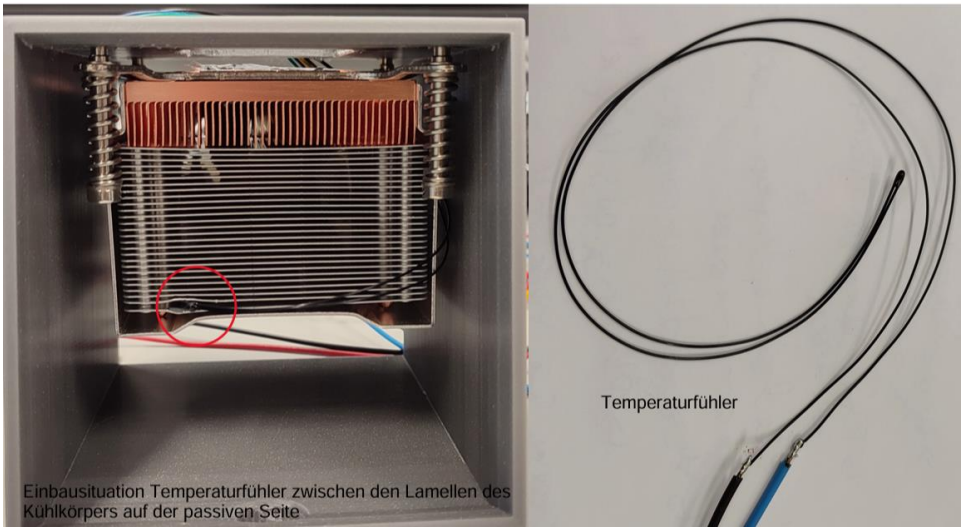

Abbildung 11 Einbau Temperaturfühler (l.), Temperaturfühler (r.)

Dabei handelt es sich um einen Temperatursensor mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC), dessen Widerstand bei einer Referenztemperatur von 25°C zehn Kiloohm beträgt. Der Widerstand des Sensors verringert sich mit steigender Temperatur.

- Software

Die Software QC-SW-DPC-01 (Abbildung 12) des Herstellers Quick-Ohm ermöglicht die Überwachung und Steuerung des Reglers. Sie dient sowohl der Anzeige des Regelstatus als auch der Parametrierung der Reglerfunktionen. In Abbildung 12 wird diese Software und der Computer als "Display" dargestellt.

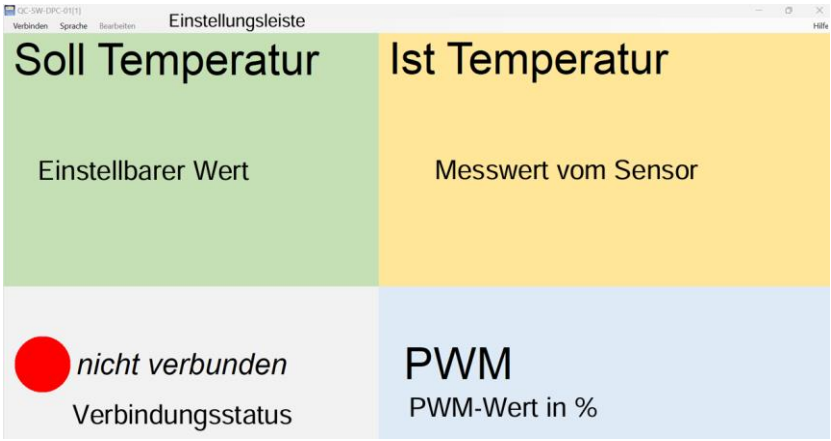

Abbildung 12 Benutzeroberfläche Software QC-SW-DPC-01

Die Verwendung der Software ermöglicht den Betrieb in zwei unterschiedlichen Modi (s. Anlage 3.2, Abbildung 3.2.1). Dabei kann die Soll-Temperatureinstellung entweder über das Potentiometer oder vollständig digital vorgenommen werden. In der Abbildung 3.2.1 sind zudem alle verfügbaren Einstellungsoptionen ersichtlich, welche für jede der Messungen gleichbleibend war.

- Verbindungsleitung

Für die Kommunikation zwischen dem Regler und dem PC ist eine spezielle Verbindungsleitung erforderlich, die einen USB-Anschluss mit einem TTL-5-Volt-Serial-Wandler und einem 3,5-mm-Audiostecker (3-polig) kombiniert und musste separat beschafft werden. Es ist zwingend darauf zu achten, dass eine Ausgangsspannung von maximal 5 Volt geliefert wird, da höhere Pegel den Regler irreparabel beschädigen.

- Potentiometer

Das Potentiometer (s. Anlage 3.2, Abbildung 3.2.2) regelt den elektrischen Widerstand des Reglers, gemessen in Ohm (Ω). Das passive Bauteil besteht aus einem Widerstandselement und einem verstellbaren Kontakt (Schleifer), der entlang des Elements bewegt wird, um den Widerstandswert zu ändern. Das Potentiometer verfügt über drei Anschlüsse: der mittlere Anschluss dient zur Abnahme des

Widerstandswerts des Schleifers, während die beiden äußeren Anschlüsse den Widerstand selbst repräsentieren. Bei der Temperaturregelung kann die Stellung des Potentiometers genutzt werden, um den Widerstand im Regelkreis zu beeinflussen, wodurch die Zieltemperatur des Systems angepasst wird. [4] Durch den Einsatz des Potentiometers kann der Regler auch ohne Display betrieben werden, wobei die Genauigkeit der Temperaturregelung jedoch deutlich eingeschränkt ist.

- Netzteile

Die elektrische Energieversorgung wird durch zwei regelbare Labornetzteile bereitgestellt. Das linke Netzteil versorgt den Regler mit einer Spannung von 15 Volt, während das in Abbildung 13 dargestellte rechte Netzteil die Energieversorgung des Peltier-Elements übernimmt. Dabei ist zu beachten, dass beide Netzteile eine maximale Stromflussstärke von etwa 2,6 Ampere liefern können.

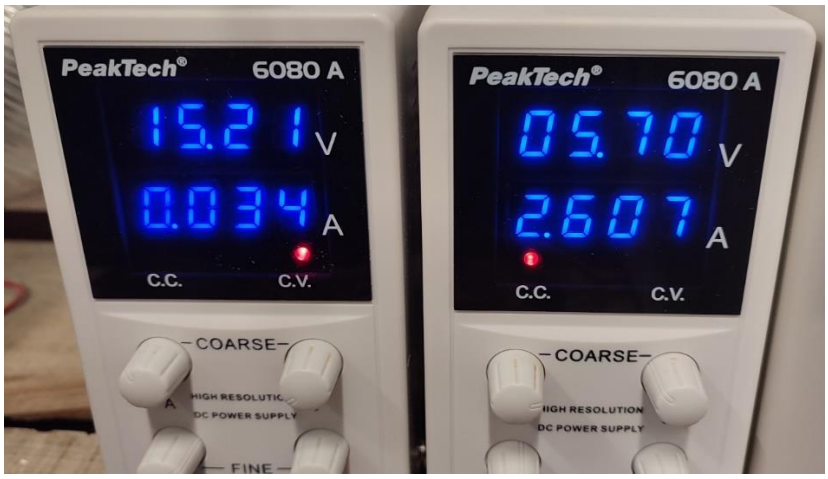

Abbildung 13 Einstellung Netzteile im maximal möglichen Betrieb

In den ersten Messungen wurden die oben genannten Labornetzteile verwendet, deren Energiebegrenzung einen Sicherheitsaspekt darstellte, da sie eine Überlastung der Komponenten verhinderten. Es wurde jedoch festgestellt, dass die maximale Stromstärke von 2,6 Ampere nicht ausreicht, um die Soll-Temperatur zu erreichen.

Die Überwachung der Temperaturen der Komponenten zeigte, dass die Leistungsgrenze des Systems noch nicht erreicht war. Daher wurden die Netzteile im weiteren Verlauf der Messungen durch leistungsstärkere Modelle ersetzt (siehe Abbildung 14). Zu beachten ist, dass der maximale Stromfluss im Experiment immer auf 5,3 Ampere begrenzt wurde, um das PE nicht zu überlasten (basierend auf der maximalen Stromaufnahme des verwendeten Peltier-Elements von 5,6 Ampere).

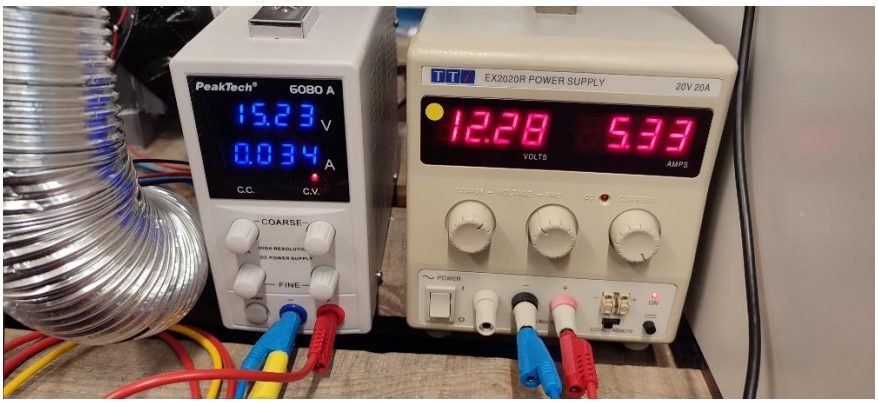

Abbildung 14 Austausch rechts gegen leistungsstärkeres Netzteil

- Regler

Der Regler wurde gemäß der Vorgabe in Abbildung 9 verdrahtet. Zur Erleichterung der Platzierung der einzelnen Komponenten wurden die elektrischen Leitungen verlängert. Die Abbildung 15 zeigt den gesamten Aufbau des Reglers (ohne Netzteile).

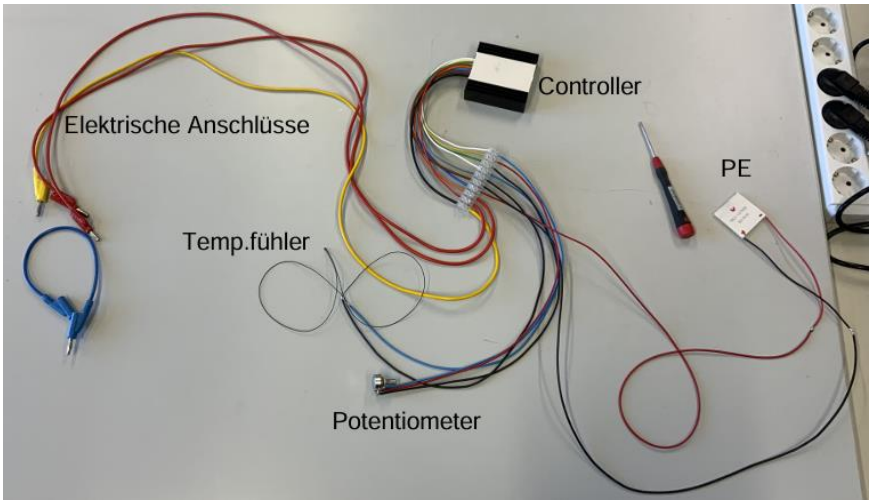

Abbildung 15 Zusammenschluss Komponenten des Reglers

4.3 Fertigung Gehäuse

Da der Aufbau des Gehäuses spezifisch für diese Anwendung entwickelt wurde, ist auf dem Markt kein vergleichbares Produkt erhältlich. Aus diesem Grund wurde das Gehäuse in Zusammenarbeit mit der Berufsakademie unter Einsatz der additiven Fertigungstechnologie gefertigt.

Die additive Fertigung, auch als 3D-Druck bekannt, ist ein Fertigungsverfahren, bei dem ein Objekt schichtweise aus digitalen 3D-Daten aufgebaut wird. Für die Modellierung der Gehäusekomponenten wurde die CAD-Software Inventor 2025 von Autodesk verwendet. Aufgrund der Größe und der Beschaffenheit des Gehäuses wurde dieses in einzelne Komponenten unterteilt und als Stecksystem konzipiert.

Das verwendete Druck Verfahren des Fused Deposition Modeling, FDM (Abbildung 16) gewährleistete eine ausreichend hohe Präzision bei der Fertigung der Bauteile. Wichtige Faktoren wie eine hohe Stabilität, Dichtheit und Feuchteresistenz des Gehäuses wurden erfüllt. Der verwendete Kunststoff war Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS).

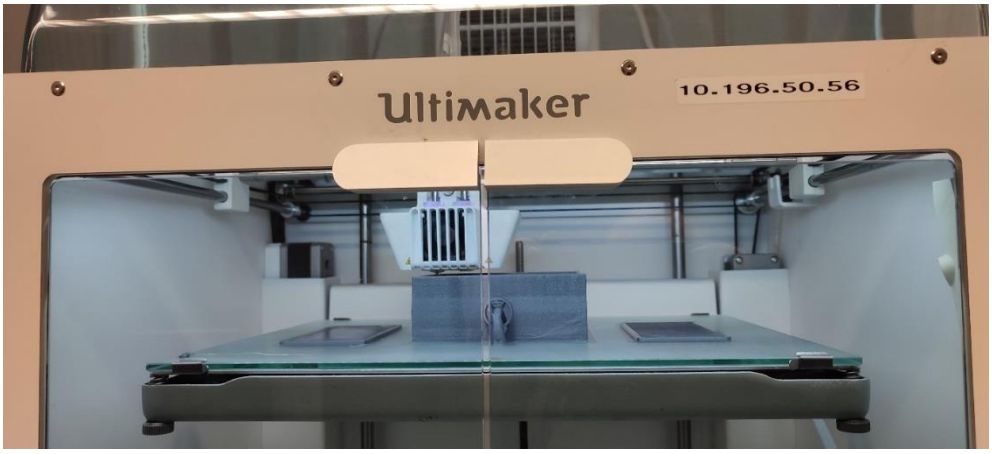

Abbildung 16 Druck der Teile im UltiMaker Drucker

Aufgrund technischer Probleme und Fehldrucken erstreckte sich der Druck der einzelnen Komponenten über etwa zwei Wochen. Die Druckzeit einzelner Komponenten betrug unter anderem bis zu 33 Stunden. Diese Faktoren sollten bei einer erneuten Planung zwingend berücksichtigt werden. Die Abbildung 17 zeigt den finalen und zusammengesetzten Prototypen.

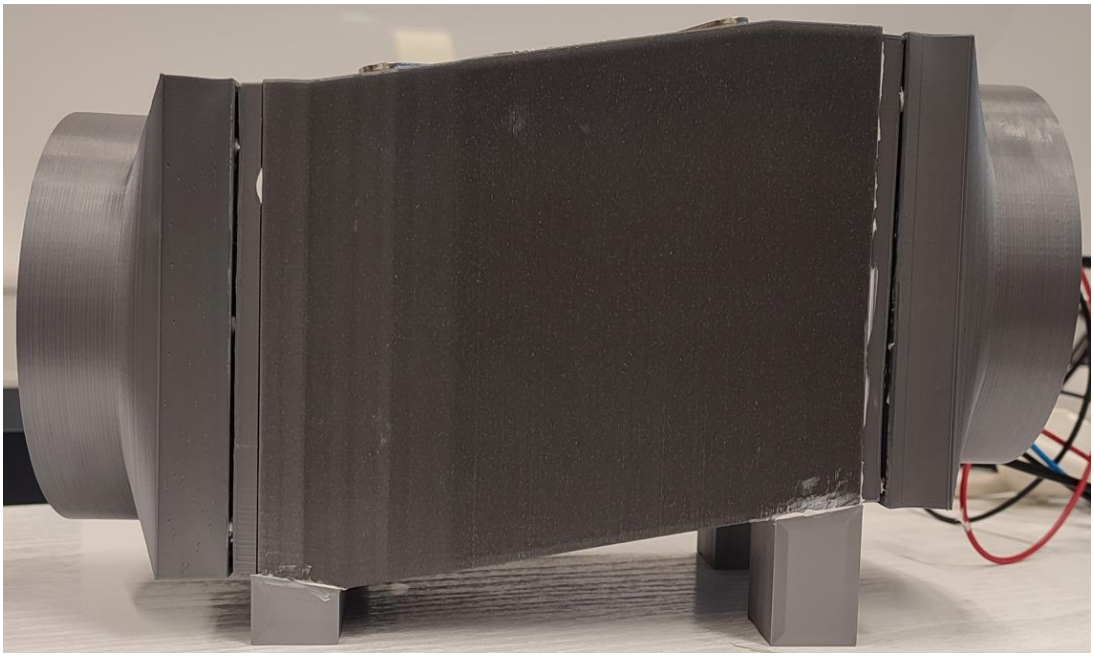

Abbildung 17 Zusammengesetztes Gehäuse

4.4 Zusammenbau Kühleinheit

Die genauen Abmessungen des Kühlkörpers der passiven Seite sowie der tatsächliche Zusammenbau des Kühlmoduls war im Vorfeld nicht bekannt, dadurch war es erforderlich, zusätzliche Öffnungen in die obere Seite des Gehäuses zu schneiden. Diese Öffnungen dienen der Einführung der Halterung des Kühlkörpers, des Peltier-Elements und der Versorgungsanschlüsse.

Der Kühlkörper ist für die Kühlung einer CPU konzipiert, die eine höhere Bauhöhe als das Peltier-Element aufweist, dadurch entstand ein freier Abstand zur oberen Kante des Gehäuses. Der Abstand zwischen den Komponenten wurde, wie in Abbildung 18 dargestellt, durch Aluminiumplatten mit den Maßen 40x40x1 mm geschlossen. Zwischen den Platten, dem Peltier-Element und den Kühlkörpern wurde eine Wärmeleitpaste aufgetragen, um den thermischen Kontakt zu optimieren und die Wärmeübertragung zu maximieren.

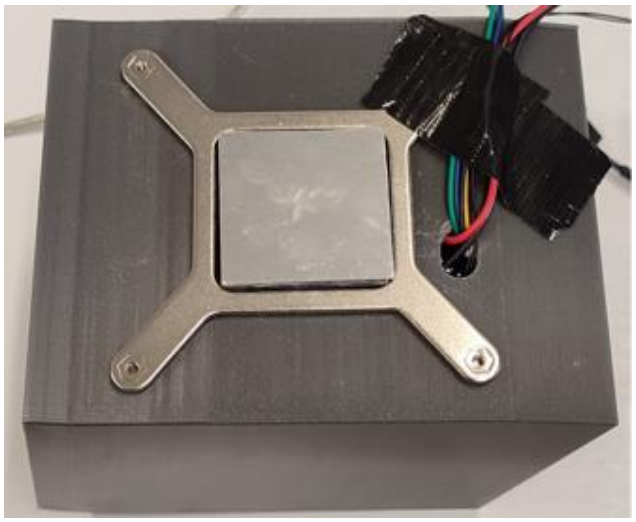

Abbildung 18 Gehäuse mit Überbrückung durch Aluminiumplatten

Nach der Fertigstellung der Komponenten Kühlmodul und Gehäuse konnten diese, wie in Abbildung 19 dargestellt, eingebaut werden.

Abbildung 19 Einbausituation Kühleinheit

5 Konstruktion Umluftsystem

In der vorangegangenen Studienarbeit wurde ein Umluftsystem entwickelt, um eine gleichmäßige Verteilung und Kühlung der Vitrine zu gewährleisten. Eine Lüftungsanlage mit Zuluft aus dem umgebenden Raum wurde verworfen, da dies eine aufwendige Aufbereitung der Zuluft erfordert hätte. Viele Exponate sind empfindlich gegenüber Staub, Feuchte, Erschütterungen und Temperaturschwankungen. Eine Umluftanlage vermindert das Eindringen von Verschmutzungen. Bei der Behandlung der Luft muss nur auf Partikel im Umluftsystem geachtet werden, dieses muss daher weitgehend dichtschließend sein.

Die Abbildung 20 (s. auch Anlage 2.4) veranschaulicht den zuvor konzipierten Aufbau des Umluftsystems.

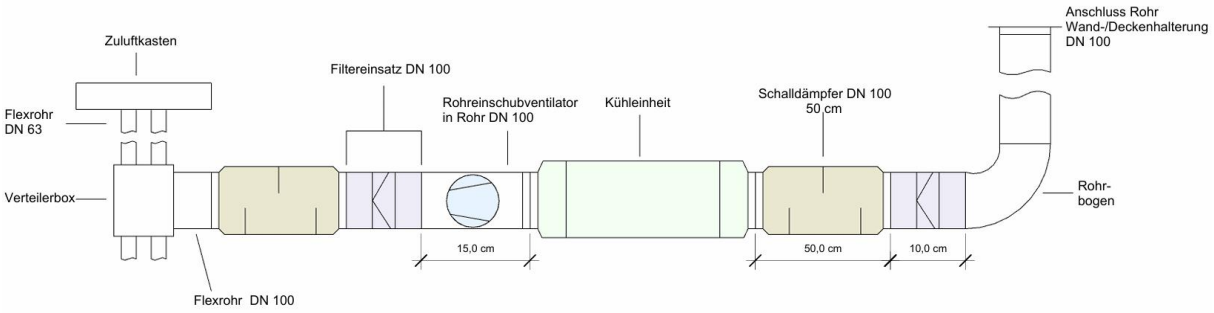

Abbildung 20 schematischer Aufbau Umluftsystem

Im Rahmen der Bearbeitung und des Aufbaus der Versuchsanlage wurden einzelne Komponenten aus der ursprünglichen Planung entfernt.

- Schalldämpfer

Gemäß der VDI-Richtlinie 2081 darf in Räumen mit Publikumsverkehr, wie beispielsweise Museen, ein maximaler Schalldruckpegel von 35 dB(A) nicht überschritten werden. [5] Diese Vorgabe wurde bei der Auswahl des Rohr-Einschublüfters und der CPU-Lüfter berücksichtigt. Da in diesem Experiment der Fokus primär auf der Untersuchung der Kühlung liegt, wurde entschieden, Schalldämpfer nicht zu integrieren.

- Filtereinsatz

Es wird zudem angenommen, dass die meisten Exponate aufgrund ihrer Beschaffenheit keine Partikel freisetzen, die gefiltert werden müssten. Konkrete Angaben seitens des Museums lagen zu diesem Sachverhalt nicht vor. Die Erforderlichkeit von Filtereinheiten sollte in Zusammenarbeit mit den Verantwortlichen der Exponate festgelegt oder durch Messungen mit dem jeweiligen Exponat ermittelt werden. Aus diesem Grund wurden der Vor- und Endfilter bei der Konstruktion der Anlage nicht berücksichtigt.

- Umbau Vitrine

Beim Umbau der Vitrine war ursprünglich vorgesehen, die offenen Seiten des unteren Bereichs zu verschließen und diesen mit schallabsorbierendem Material auszukleiden. Um jedoch eine bessere Zugänglichkeit zur technischen Anlage in diesem Bereich zu gewährleisten, wurde dieser Umbau nicht durchgeführt.

Die restlichen Komponenten, einschließlich des Abluftanschlusses, der Kühleinheit, der Zuluftverteilerbox, der Zuluftkästen und dem Ventilator, wurden entsprechend der Entwurfsplanung umgesetzt.

5.1 Mechanische Umbauten

Für bestimmte Komponenten konnte kein passendes Produkt auf dem Markt identifiziert werden. Daher sah die Entwurfsplanung vor, diese Komponenten manuell umzubauen. Zur vollständigen Realisierung der Anlage war auch ein Umbau der Vitrine erforderlich. Im ersten Schritt wurden die folgenden Komponenten umgebaut bzw. errichtet:

- Zuluftverteilerbox

Um die Zuluft auf die vier Stränge aufzuteilen, wurde ein Luftverteilerkasten beschafft, der jedoch nur über zwei Abgänge verfügte. Zur Gewährleistung eines symmetrischen Aufbaus und einer gleichmäßigen Verteilung wurden auf der gegenüberliegenden Seite der Anschlüsse zwei weitere Öffnungen für die Rohradapter in das Blech eingearbeitet.

Wie in Abbildung 21 ersichtlich, war zur Optimierung der Strömungsverteilung der Luft ein schräg angebrachtes Blech im Verteilerkasten eingesetzt. Nach dem Aufbohren der Nieten wurde das Blech entfernt, und der Verteilerkasten wurde anschließend wieder abgedichtet und durch Vernieten verschlossen.

Abbildung 21 Seitenansicht Verteilerkasten

Der Anschlussstutzen hat eine Nennweite von 124 mm. Um einen Anschluss an ein DN100-Rohr zu ermöglichen, wurde ein Reduzierstück entworfen, das mit Hilfe von Inventor 2025 modelliert und durch die additive Fertigung hergestellt wurde (s. Reduzierstück Anlage 3.2, Abbildung 3.2.3).

- Vitrine

Zur Ermöglichung des Anschlusses des Abluftrohres und der Platzierung der Zuluftkästen wurden, wie in Abbildung 22 dargestellt, die erforderlichen Öffnungen ausgeschnitten. Zusätzlich wurden die elektrischen Leitungen der Beleuchtung und die Querbalken unter dem Exponattisch entfernt.

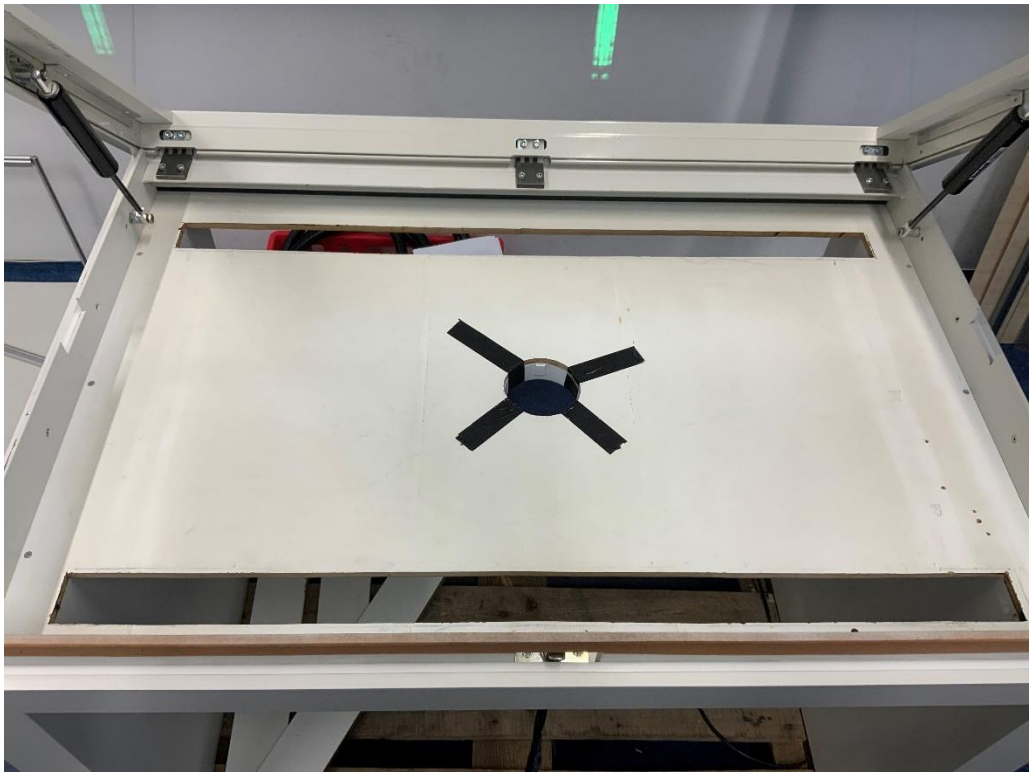

Abbildung 22 Ausschnitte Vitrine

- Zuluftkasten

Während des Baus der Zuluftkästen wurde festgestellt, dass die geplanten Flachkanäle mit den Abmessungen 54 x 110 mm in der Höhe nicht ausreichten, um die Zuluftrohre platzieren zu können. Daher wurde ein Neubau mit Flachkanälen der nächsthöheren Größe durchgeführt.

Die beiden Zuluftkästen wurden somit aus Flachkanälen mit den Abmessungen 54 x 220 mm hergestellt. Dabei wurde die obere Seite des Kanals entfernt, und im unteren Drittel wurden zwei Löcher für die Zuluftrohre ausgeschnitten. Die Kanalenden wurden behelfsweise mit Klebeband abgedichtet. Zur optischen Verbesserung der Zuluftkästen wurde ein Stoff über den freien Querschnitt gespannt.

Während der Bearbeitung wurde festgestellt, dass sich die Kanäle nach dem Entfernen der oberen Seite stark zusammenklappen. Zur Lösung dieses Problems wurden passende Kunststoffplatten eingesetzt, die die Seiten auseinanderdrücken.

Es wurde die Erkenntnis gewonnen, dass bei einer erneuten Bearbeitung der Flachkanäle mindestens an den Enden und in der Mitte jeweils ein Stück der oberen Kanalseite verbleiben muss, um eine bessere Stabilität zu gewährleisten.

Zum Abschluss wurde eine neue Objekttischplatte mit einer weißen Folie überzogen und in die Vitrine eingesetzt. Die Abbildung 23 veranschaulicht die fertige Ausgestaltung des Innenraums der Vitrine.

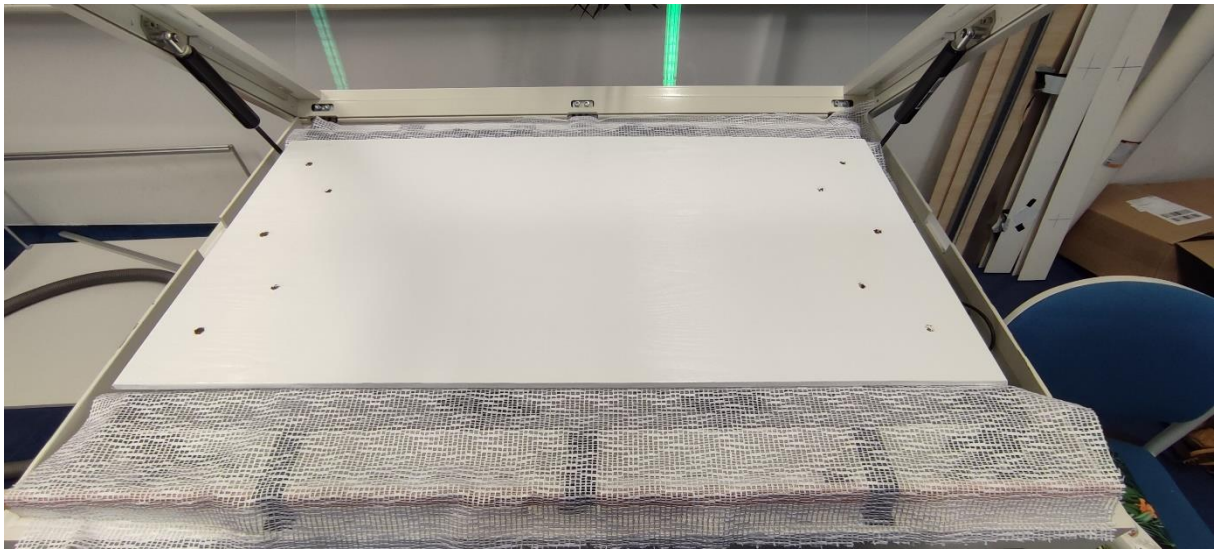

Abbildung 23 Fertiger Innenausbau der Vitrine

- Rohreinschubventilator

Im Gegensatz zur Beschreibung des Rohreinschubventilators auf der Website des Lieferanten ist dieser nicht regelbar. Das betreffende Produkt wurde inzwischen von der Webseite des Lieferanten entfernt, weshalb keine weiteren technischen Daten wie Druckverhältnisse, Kennlinien oder ähnliche Spezifikationen mehr nachvollziehbar sind. Bekannte Daten sind folgend aufgeführt.

Der Ventilator des Herstellers Sygonix hat ein Leistungsvolumen von 130 m^3/h und wurde aufgrund seiner Leistungsreserve (zu den ermittelten 70 m^3/h) ausgewählt. Zur Reduzierung der Leistung des Ventilators wurde eine Diode in die Schaltung integriert (Abbildung 24). Diese ermöglicht zwar keine vollständige Regelung, sollte jedoch zu einer Drosselung der Leistung um etwa 50 Prozent führen. Die Machbarkeit dieser Modifikation wurde zuvor unter Laborbedingungen getestet.

Die geplante Lösung zur Leistungsreduktion des Ventilators erwies sich im realen Aufbau als nicht funktional, da sich der Ventilator nach dem Anschluss an die elektrische Netzsteckerverbindung nicht mehr drehte. Infolgedessen wurde der Ventilator mit seiner vollen Leistung in Betrieb genommen.

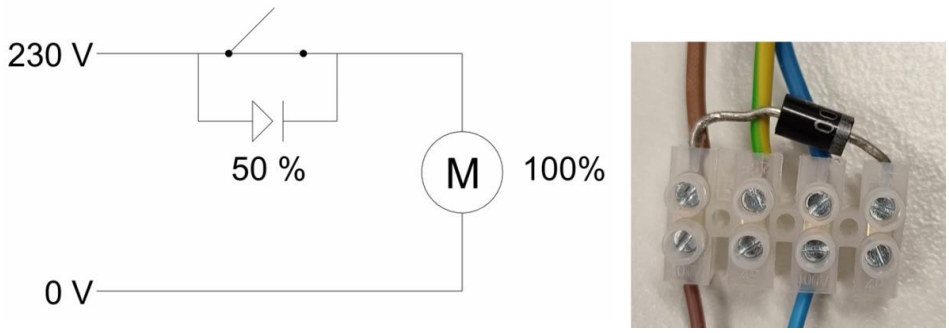

Abbildung 24 Verschaltung Diode mit Ventilator (l.), realer Zusammenschluss (r.)

5.2 Zusammenbau Umluftsystem

Nach der Fertigstellung der Kühleinheit und den mechanischen Umbauten wurde mit dem Zusammenbau im Untertischbereich der Vitrine fortgefahren. Zu diesem Zweck wurden die einzelnen Komponenten positioniert und die jeweiligen Abluft- und Zuluftrohre angeschlossen (Abbildung 25).

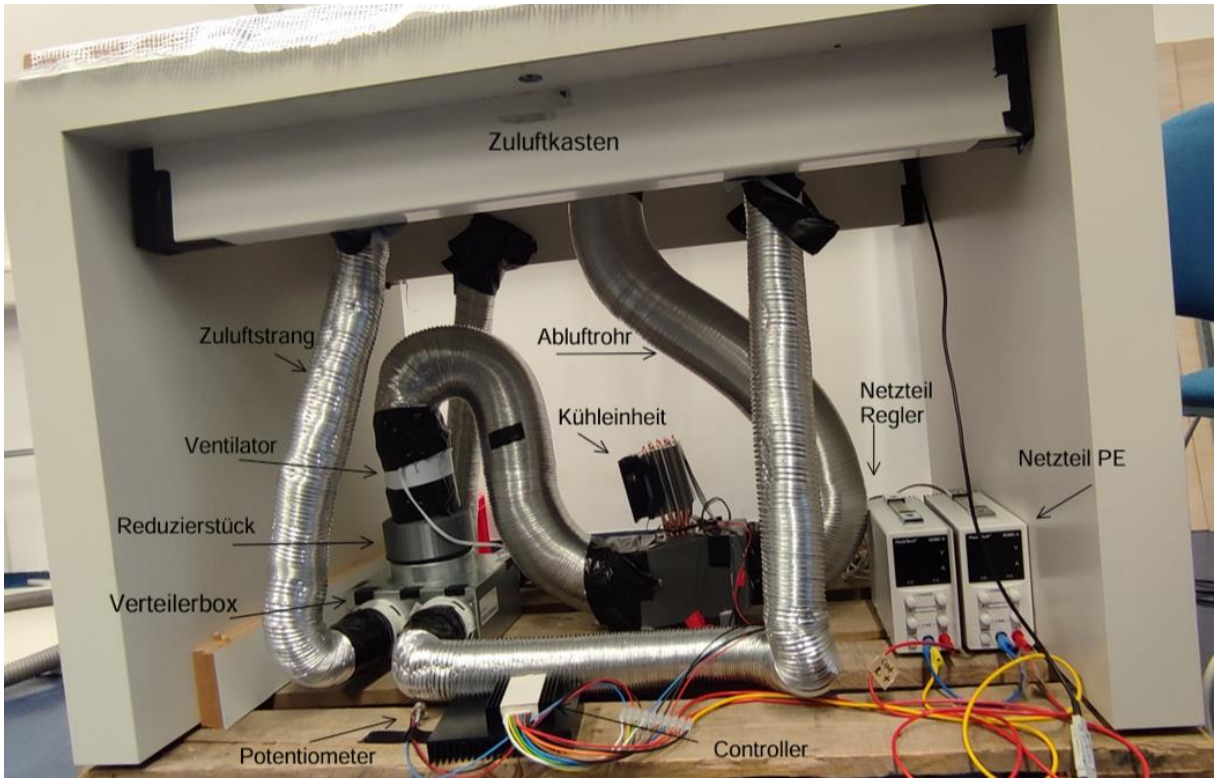

Abbildung 25 Abschluss Umbau

6 Messwerterfassung

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der durchgeführten Experimente systematisch dargestellt. Die Untersuchungen erfolgten in zwei aufeinanderfolgenden Phasen. Zunächst wurde die Kühleinheit isoliert analysiert, um deren grundlegende Funktionalität zu überprüfen. Im Anschluss daran wurde die gesamte technische Anlage im Verbund getestet, um die Gesamtleistung und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zu evaluieren.

6.1 Voruntersuchung Kühleinheit

Die Kühleinheit wurde sukzessive entsprechend der Fertigstellung einzelner Komponenten und der Lieferung zusätzlicher Bauteile aufgebaut. Der Fokus lag dabei zunächst auf der präzisen Montage und Funktionalität des Kühlmoduls.

Dabei wurde jeder Arbeitsschritt sorgfältig überprüft, um eine einwandfreie Funktion sicherzustellen. Der Prozess begann, wie in Abbildung 3 dargestellt, mit dem ersten Anschluss des Peltier-Elements.

Während des gesamten Montageprozesses wurden die Komponenten einer Kontrollwiderstandsmessung unterzogen, um die Integrität der Verbindungen sicherzustellen, insbesondere die gelöteten Verbindungen wurden geprüft. Nach dem Zusammenbau des Reglers, wie in Abbildung 15 dargestellt, erfolgte eine initiale Ansteuerung des Systems über das Potentiometer, wobei die Temperaturverhältnisse am Peltier-Element rein haptisch überprüft wurden.

Zu Beginn der Inbetriebnahme des Reglers und des Peltier-Elements in Kombination mit dem Display war das Verhalten des Systems nicht abschätzbar hinsichtlich einer möglichen Überhitzung der elektrischer Leitungen oder einer Erwärmung des Controllers. Aus diesem Grund wurde die Energiezufuhr schrittweise über die regelbaren Netzteile erhöht, um die Eignung des Reglers zu testen. Jedoch wurde der Stromfluss von einem Ampere in der Testung nicht überschritten. Des Weiteren war das Peltier-Element nicht als vollständiges Kühlmodul angeschlossen, sondern wie in Abbildung 26 als Test folgend aufgebaut:

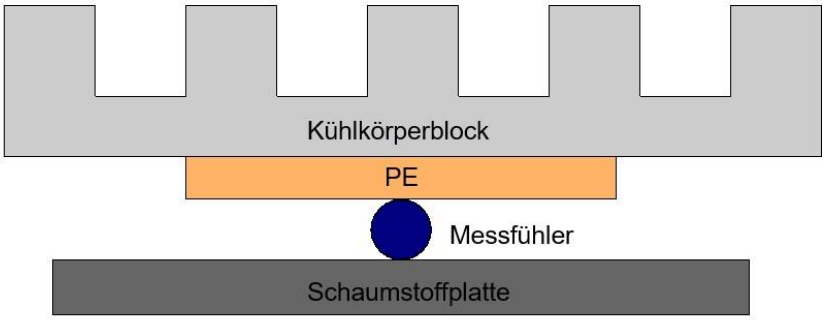

Abbildung 26 Testaufbau Regler und PE

Zur Sicherstellung der Betriebssicherheit wurden sämtliche Komponenten des Reglers mittels einer Wärmebildkamera überwacht. Die Abbildungen 27 und 28 zeigen die gemessenen Temperaturverteilungen im System nach einer Laufzeit von 30 Minuten bei einer Begrenzung von einem Ampere.

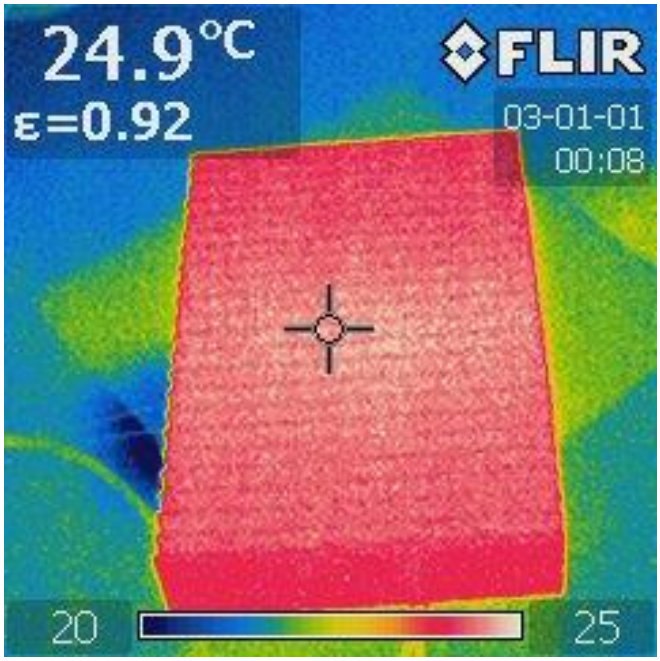

Abbildung 27 Wärmebild Kühlkörper

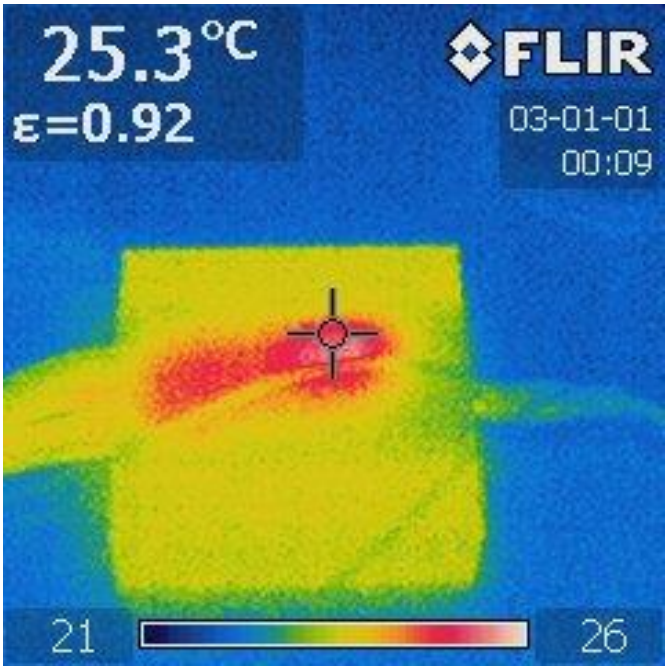

Abbildung 28 Wärmebild Controller (rot Transistoren)

Die Einregelung des Systems lässt sich durch zwei Hauptfaktoren überprüfen: Zum einen erfolgt eine Überwachung der Annäherung zwischen Soll- und Ist-Temperatur, um die Genauigkeit der Temperaturregelung zu beurteilen. Zum anderen kann die Pulsweitenmodulation (PWM) als Indikator für den Regelprozess dienen (Abbildung 29).

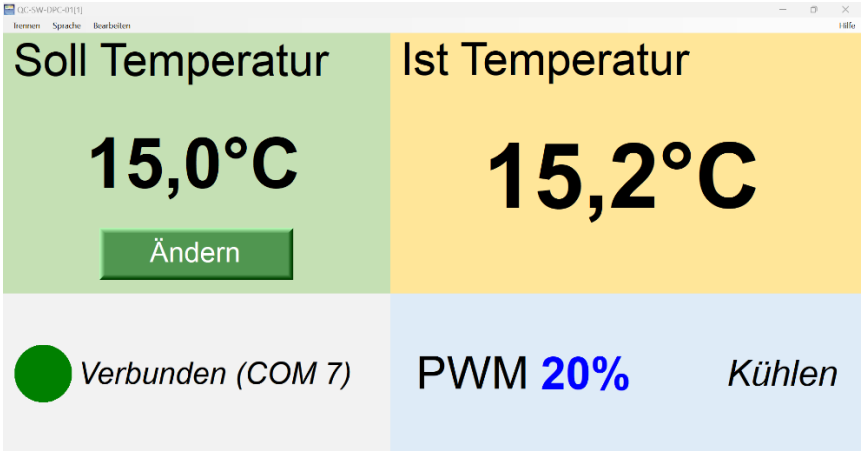

Abbildung 29 Anzeige im QC-SW-DPC-01 während des ersten Betriebs

Die Ergebnisse der ersten Überprüfung des Reglers sind positiv zu bewerten. Die Auswertung der Wärmebilder zeigte, dass keine der Komponenten eine kritisch zu bewertende Temperatur erreichte. Im Anschluss an diese Tests wurde der Regler gemeinsam mit dem Kühlmodul in das Gehäuse integriert.

6.2 Temperaturmessung an der Kühleinheit

Insgesamt wurden fünf verschiedene Messungen an der Kühleinheit durchgeführt, wobei jede Messung auf einem neuen Kenntnisstand oder veränderten Parametern basierte. In den folgenden Unterpunkten werden die entsprechenden Parameter sowie die Messergebnisse detailliert dargestellt. Die Abbildung 30 zeigt die Positionierung der einzelnen Temperatursensoren.

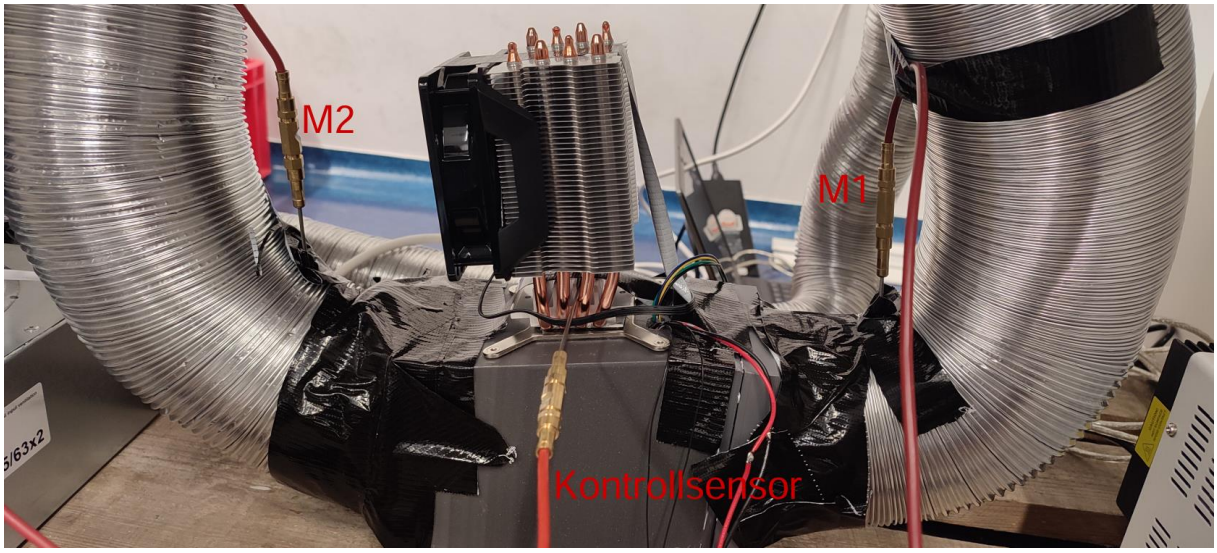

Abbildung 30 Aufbau Messung der Temperatur an M1, M2 der Kühleinheit

- Messung 1

Die Temperaturen wurden an den Messpunkten M1 und M2 erfasst, um den Zeitpunkt zu bestimmen, an dem die Soll-Temperatur von 16 °C erreicht wird und ein thermisches Gleichgewicht im System eintritt. Zusätzlich wurde die Ist-Temperatur über den Messfühler des Reglers erfasst. Während der Messungen war der Ventilator und der CPU-Lüfter (kalte Seite) mit 100% der möglichen Leistung aktiv, sodass die Messungen mit dem vollständig in Betrieb befindlichen Umluftsystem durchgeführt wurden.

Zusätzlich erfolgte eine Temperaturmessung am Kühlkörper auf der warmen Seite mithilfe eines Kontrollsensors, um zu überprüfen, ob die Abwärme effektiv abgeführt werden kann. Diese Verifizierung wurde notwendig, da der zuvor eingesetzte Kühlkörperblock unzureichend dimensioniert war. Zusätzlich sollte ermittelt werden, ob die Dimensionierung des aktuell verbauten Kühlkörpers ebenfalls ab einer bestimmten Abwärmetemperatur nicht mehr ausreichend ist. Aufgrund der begrenzten Zeichenzahl des Messgeräts wird der Kontrollsensor in den Diagrammen sowie in den Messdokumentationen als „Kontrolle“ bezeichnet.

In der Anlage 4.1 ist das vollständige Messprotokoll zu der Messaufnahme eins dokumentiert. Das Temperatur-Zeit-Diagramm (Abbildung 31) verdeutlicht, dass sich bei der maximal möglichen Stromstärke von etwa 2,6 Ampere, begrenzt durch das Netzteil, ein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat. Aus den Daten wird jedoch ersichtlich, dass dieser Stromfluss nicht ausreicht, um die erforderliche Soll-Temperatur am Messpunkt M2 zu erreichen.

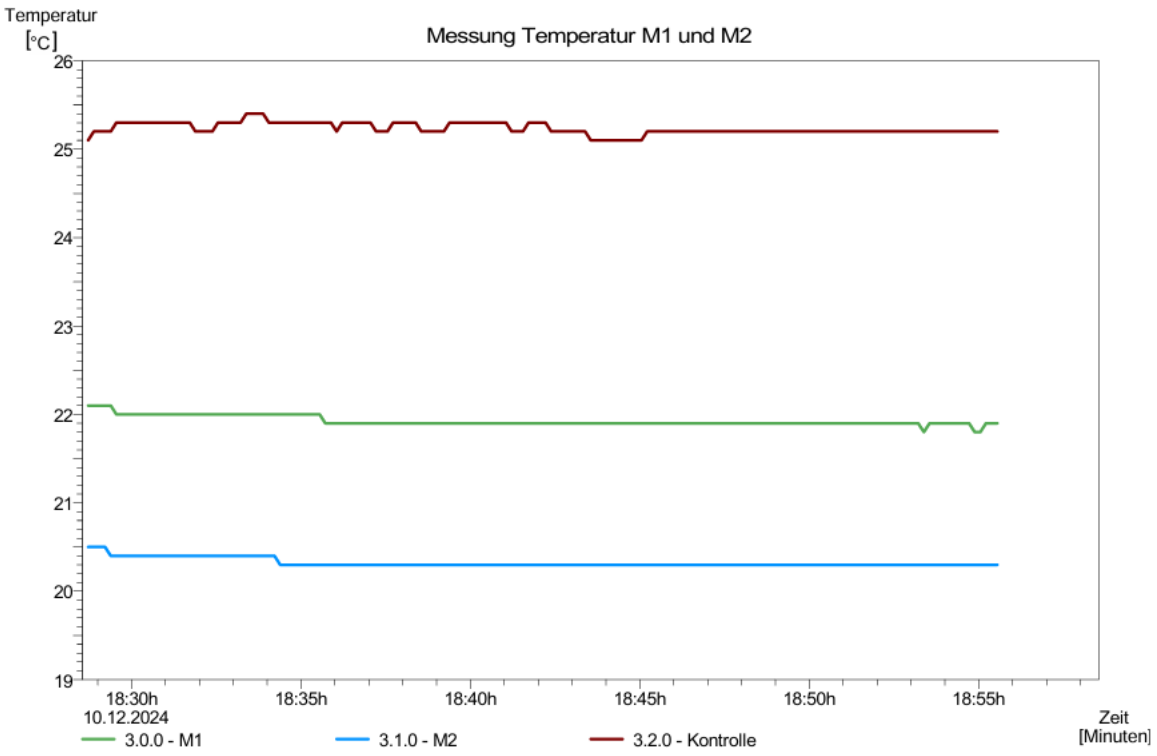

Abbildung 31 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 1 an M1, M2 und Kontrollsensor

Die Tabelle 3 dokumentiert die gemessenen Temperaturen an den jeweiligen Messstellen zum Beginn und nach 30 Minuten der Messung. Es wurden keine signifikanten Temperaturänderungen an den Messpunkten M1 oder M2 festgestellt. Ausreißer der Messung an M1 gegen 18:53 Uhr wurden als Messfehler mit einer Abweichung von 0,1°C bewertet, da an dem System zu diesem Zeitpunkt keine Parameter verändert worden sind.

Messpunkt	Temperatur zum Start der Messung [°C]	Temperatur nach 30 Minuten Betriebszeit [°C]
M1	22,2	21,9
M2	22	20,3
Kontrollsensor	21,8	25,2
Messfühler	22,5	20,8

Tabelle 3 Messwerte aus der Messung 1 an M1, M2, Kontrollsensor, Messfühler

- Messung 2

Da nach kurzer Zeit eine Stagnation der Temperaturveränderungen festgestellt worden ist, wurde wie in Kapitel 4.2 im Unterpunkt "Netzteile" beschrieben, ein leistungsstärkeres Netzteil für die Energieversorgung des Peltier-Elements eingesetzt. Der Stromfluss wurde schrittweise auf 5,3 Ampere erhöht. Alle weiteren Rahmenbedingungen sind wie in Messung 1 gleichgeblieben (Messdokumentation s. Anlage 4.2).

Die Abbildung 32 des Temperatur-Zeit-Diagramms zeigt die Temperaturverteilung an den einzelnen Messpunkten. Dabei wird deutlich, dass nach elf Minuten ein Ausreißer am Kontrollsensor auftrat. Dieser Ausreißer resultierte aus einer fehlerhaften Positionierung des Kühlkörpers auf der warmen Seite, der verrutscht war und somit den Wärmeübergang beeinträchtigte. Nach der Korrektur der Position konnte die Wärmeabfuhr wiederhergestellt werden, wodurch die Temperatur sank. Das gemessene Temperaturmaximum von 30,7 °C wird als Messfehler betrachtet.

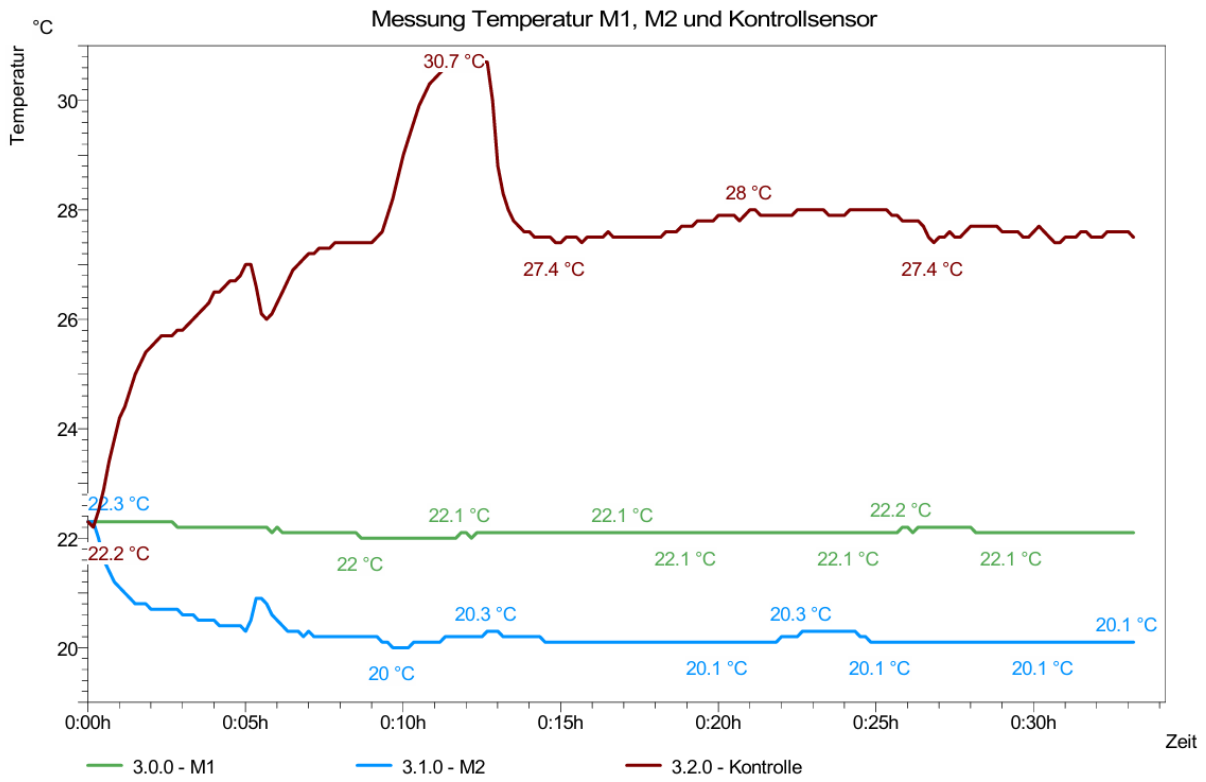

Abbildung 32 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 2 an M1, M2 und Kontrollsensor

Während der zweiten Messung wurde alle zehn Minuten die Messfühlertemperatur festgehalten. Die Tabelle 4 veranschaulicht die folgenden Messdaten:

Messpunkt	Temp. zum Start [°C]	Temp. nach 10 min [°C]	Temp. nach 20 min [°C]	Temp. nach 30 min. [°C]
M1	22,3	22	22,1	22,1
M2	22,3	20	20,1	20,1
Kontrollsensor	22,2	29	27,9	27,6
Messfühler	22,5	20,9	20,8	20,8

Tabelle 4 Messwerte aus der Messung 2 an M1, M2, Kontrollsensor, Messfühler

- Messung 3

Während der dritten Messung (Messdokumentation s. Anlage 4.3) wurde der Axiallüfter am Kühlkörper der kalten Seite auf die kleinstmögliche Drehzahl runter geregelt. Der Stromfluss blieb bei 5,3 Ampere. Die Abbildung 33 zeigt wieder das Temperatur-Zeit-Diagramm, wobei ersichtlich ist, dass diese Messung für 20 Minuten durchgeführt worden ist. Die Messwerte des Temperaturmessfühlers wurden nicht aufgenommen.

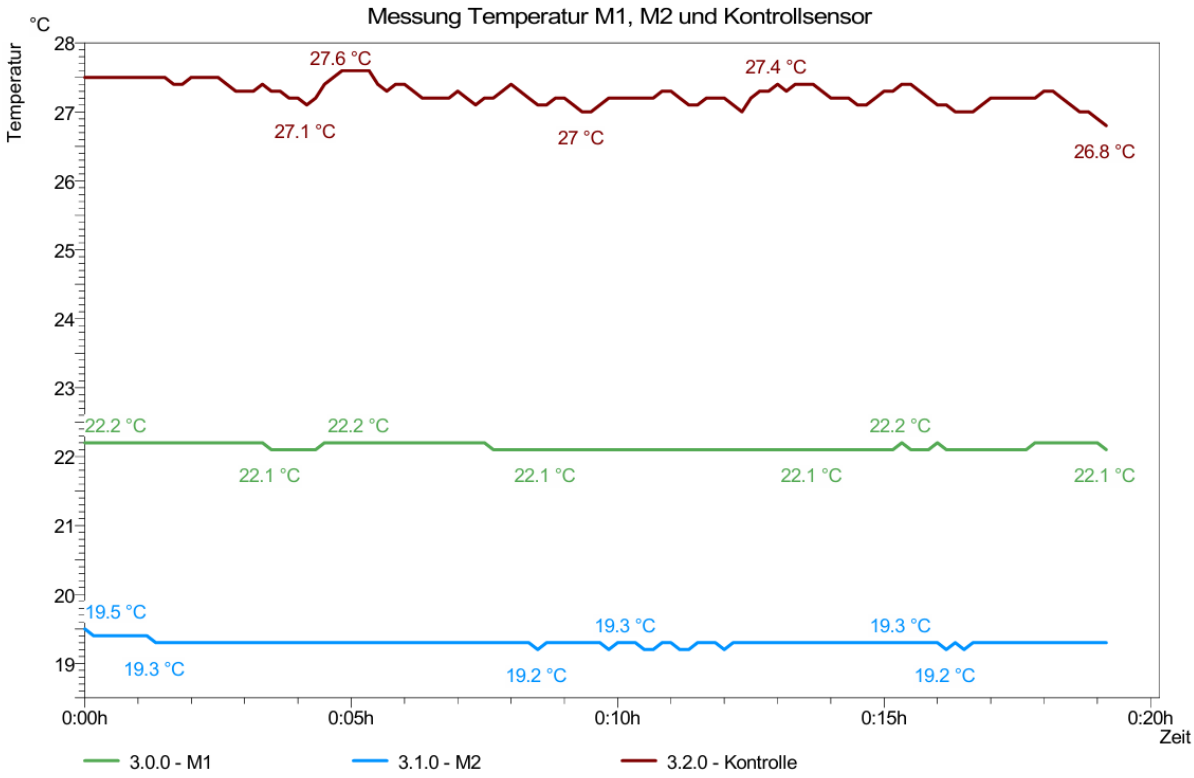

Abbildung 33 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 3 an M1, M2 und Kontrollsensor

Mit einigen kleineren Regelschwankungen konnten für die einzelnen Messpunkte folgende Mittelwerte erfasst werden:

- M1: 22,1°C
- M2: 19,3 °C
- Kontrollsensor: 27,3°C

▪ Messung 4

Die Abbildung 34 zeigt das Temperatur-Zeit-Diagramm, nach fünf Minuten Laufzeit der Messung vier wurde der Axiallüfter am Kühlkörper der kalten Seiten ausgeschalten (Messdokumentation s. Anlage 4.4).

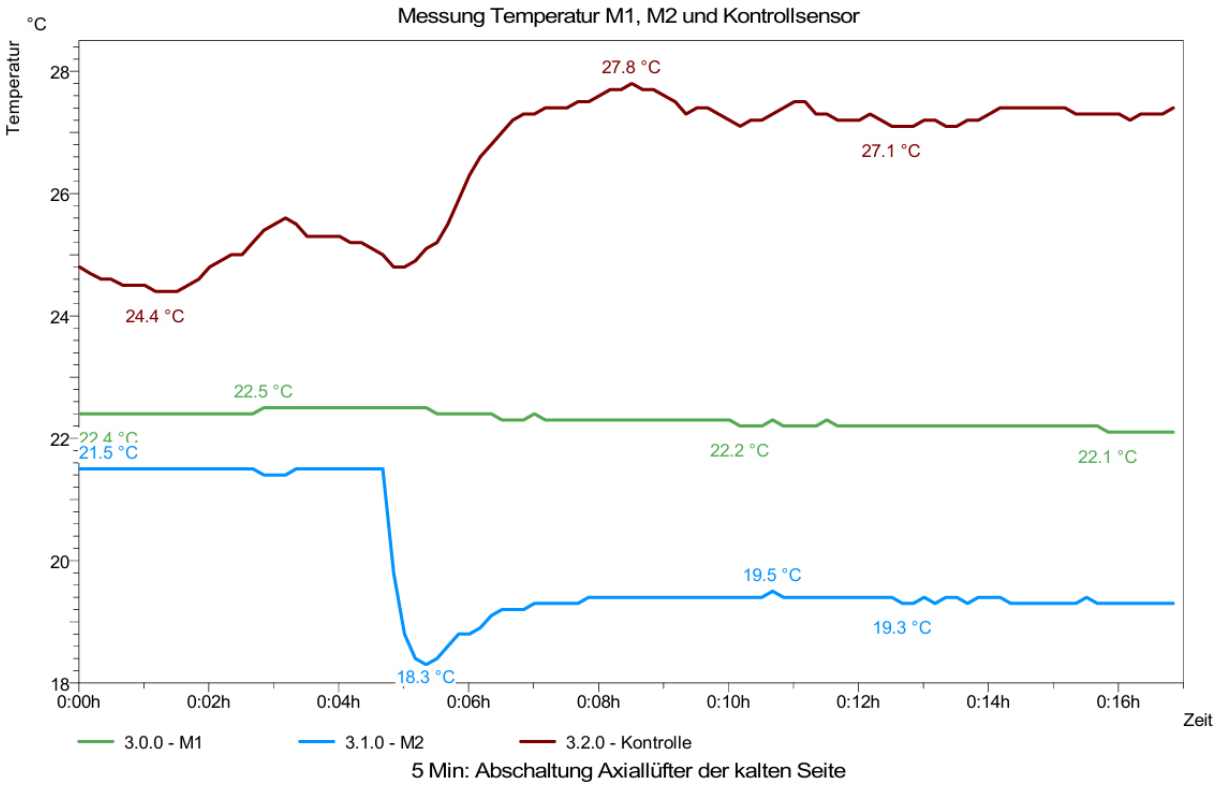

Abbildung 34 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 4 an M1, M2 und Kontrollsensor

Zusätzlich wurde über die Software des Reglers die Soll- und Ist-Temperatur direkt nach dem Ausschalten des Lüfters aufgenommen (Abbildung 35).

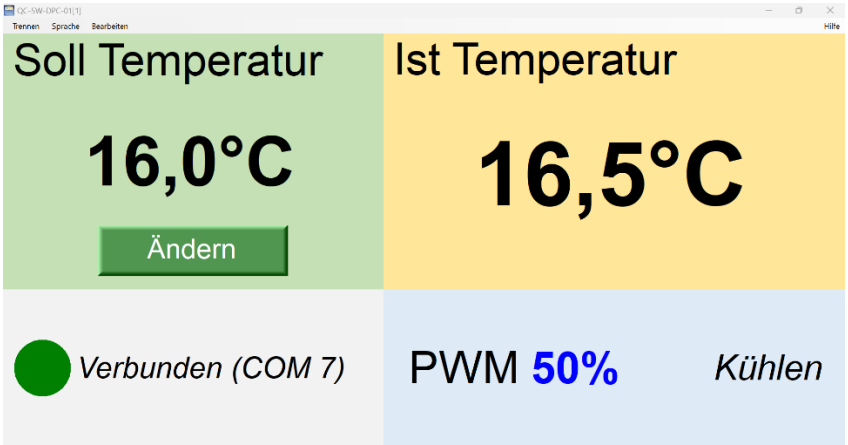

Abbildung 35 Soll- und Ist-Temperatur nach Abschalten des Axiallüfters auf der kalten Seite

Hierbei ist ersichtlich, dass die Ausgangstemperatur M2 kurzzeitig einen Tiefstwert von 18,3°C erreicht und der Regler sich der vorgegebenen Soll-Temperatur (am Messfühler) näherte. Jedoch stiegt die Temperatur im weiteren Verlauf, wie in Abbildung 34 ersichtlich, der Messung an M2 wieder an.

Da der Regler während dieser Messung sich zum ersten Mal der vorgegebenen Soll-Temperatur (am Messfühler) näherte, wurde die Reaktionsfähigkeit des Reglers im weiteren Verlauf der Messung getestet. Eine kurze Aufnahme ist in der Anlage 5.1 zu finden.

Durch die Änderung der Parameter in der Software sind Temperaturschwankungen ab ca. der 12. Minute im Temperatur-Zeit-Diagramm erkennbar.

- Messung 5

Während der fünften Temperaturmessung sollte zu den Messpunkten M1, M2 und dem Kontrollsensor weitere Temperaturen innerhalb der Vitrine erfasst werden. Geplant waren zwei Temperaturfühler und ein kapazitiver Fühler. Jedoch war zum Beginn der Messung erkennbar, dass ein technisches Problem beim Regler oder beim Peltier-Element vorlag. Das System (Ventilatoren, Netzteile, Regler) war zuvor vollständig ausgeschaltet gewesen.

Das Temperatur-Zeit-Diagramm (Abbildung 36) zeigt, verglichen mit den vorherigen Messungen eins bis vier, die klaren Temperaturabweichungen. Die Messung wurde nach sechs Minuten abgebrochen.

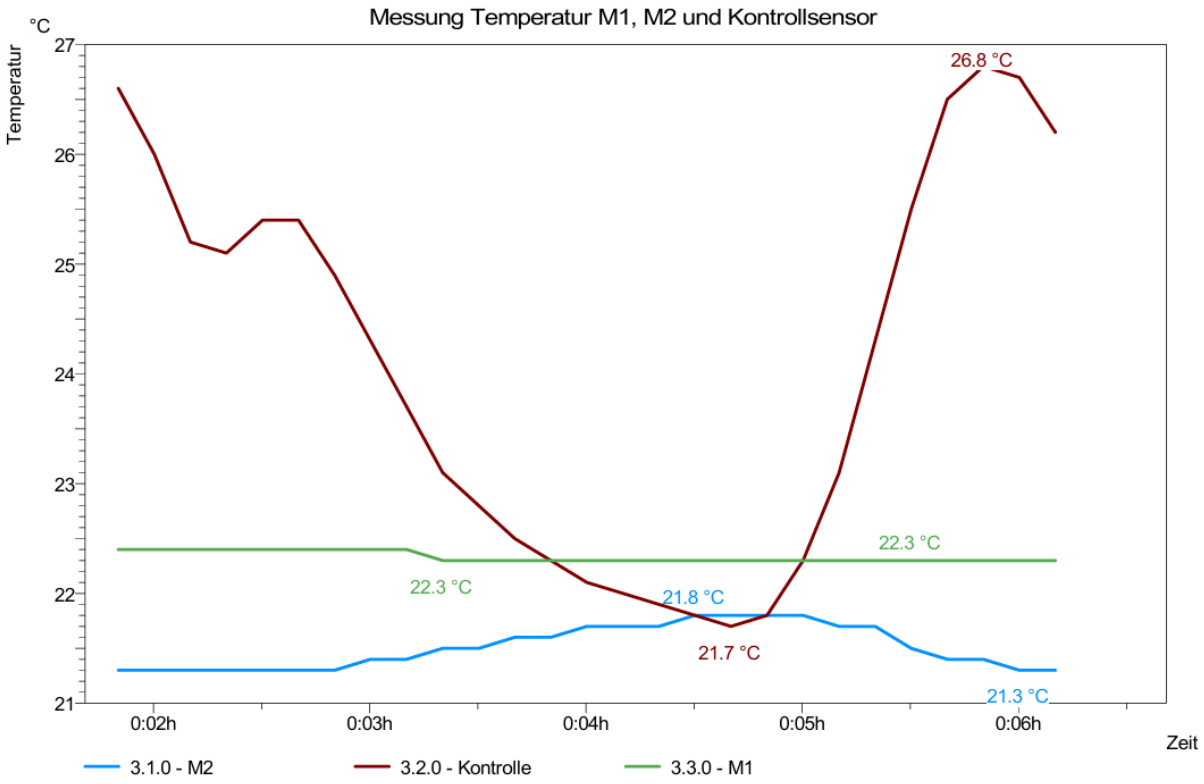

Abbildung 36 Temperatur-Zeit-Diagramm der Messung 5 an M1, M2 und Kontrollsensor

Nach einem Neustart aller Geräte, wurde am Netzteil für die Energieversorgung des Peltier-Elements wie zuvor die benötigten 5,3 Ampere eingestellt. Jedoch regelte das Netzteil den Stromfluss immer wieder runter auf 1,5 bis 2,5 Ampere (s. Anlage 5.2).

Während der Messzeit wurden über den kapazitiven Fühler die folgenden Mittelwerte innerhalb der Vitrine erfasst:

- Temperatur: 22,4°C
- Relative Luftfeuchte: 26,9%
- Luftdruck: 996,5 Pa

Es wird vermutet, dass das Peltier-Element beschädigt wurde, da das Netzteil nach dem Einschalten des Systems (nach einer Messpause) kurzfristig einen Stromfluss von über 8 Ampere angezeigt hat. Obwohl eine kurzzeitige Überbelastung des Peltier-Elements in der Regel keinen Schaden verursachen sollte, kann eine Beschädigung nicht ausgeschlossen werden. Alternativ könnte der Fehler auch im Netzteil selbst liegen. Eine Behebung der Störung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, und die Temperaturmessungen wurden daraufhin beendet.

6.3 Messung Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit wurde an drei definierten Messpunkten erfasst. Aufgrund der Bauweise des Sensors mit Schutzbügeln war eine Messung ausschließlich an diesen Punkten möglich.

- Messung Abluft

Am Abluftstutzen innerhalb der Vitrine wurde die Strömungsgeschwindigkeit der Abluft, wie in Abbildung 37 dargestellt, mithilfe eines Geschwindigkeit-Zeit-Diagramms visualisiert.

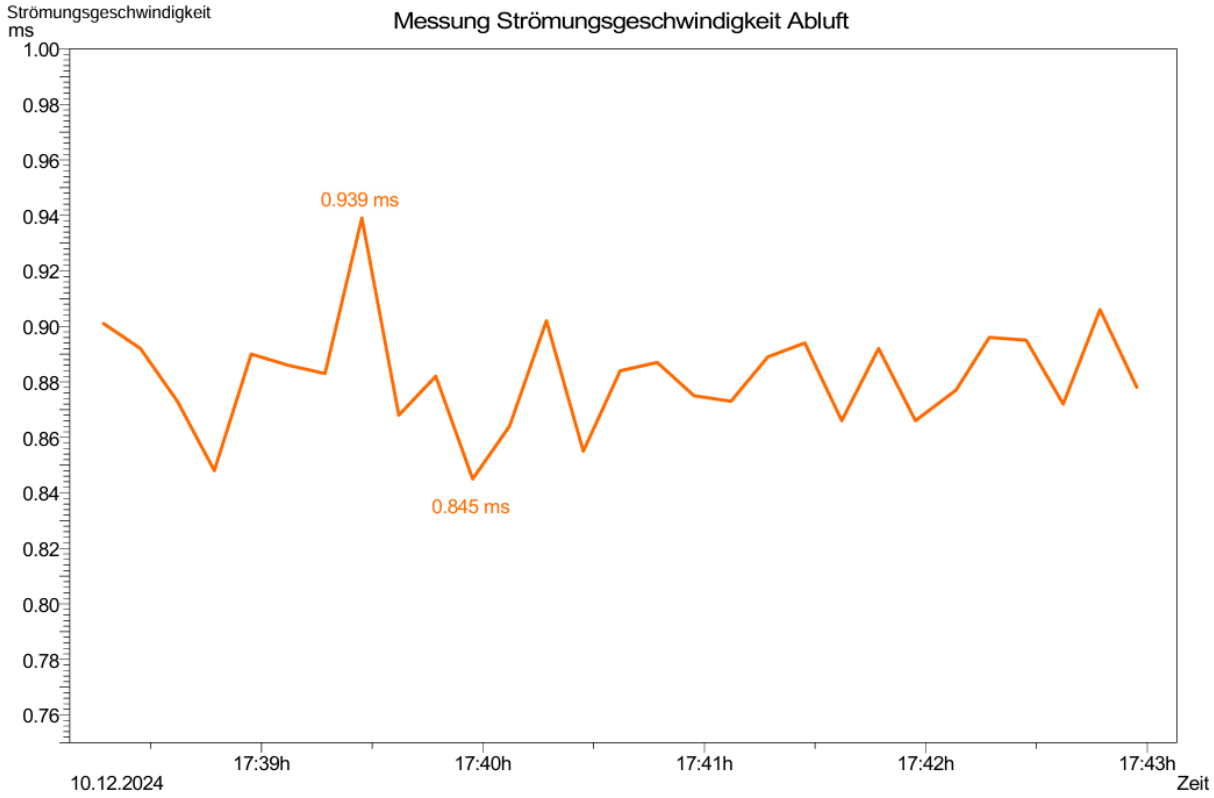

Abbildung 37 Messung Strömungsgeschwindigkeit Abluft

Zusätzlich zur Abluft wurden an den Zuluftkästen Messungen an den Punkten $M4_S$ und $M4_N$ durchgeführt. Die entsprechenden Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme sind in den Abbildungen 38 und 39 veranschaulicht.

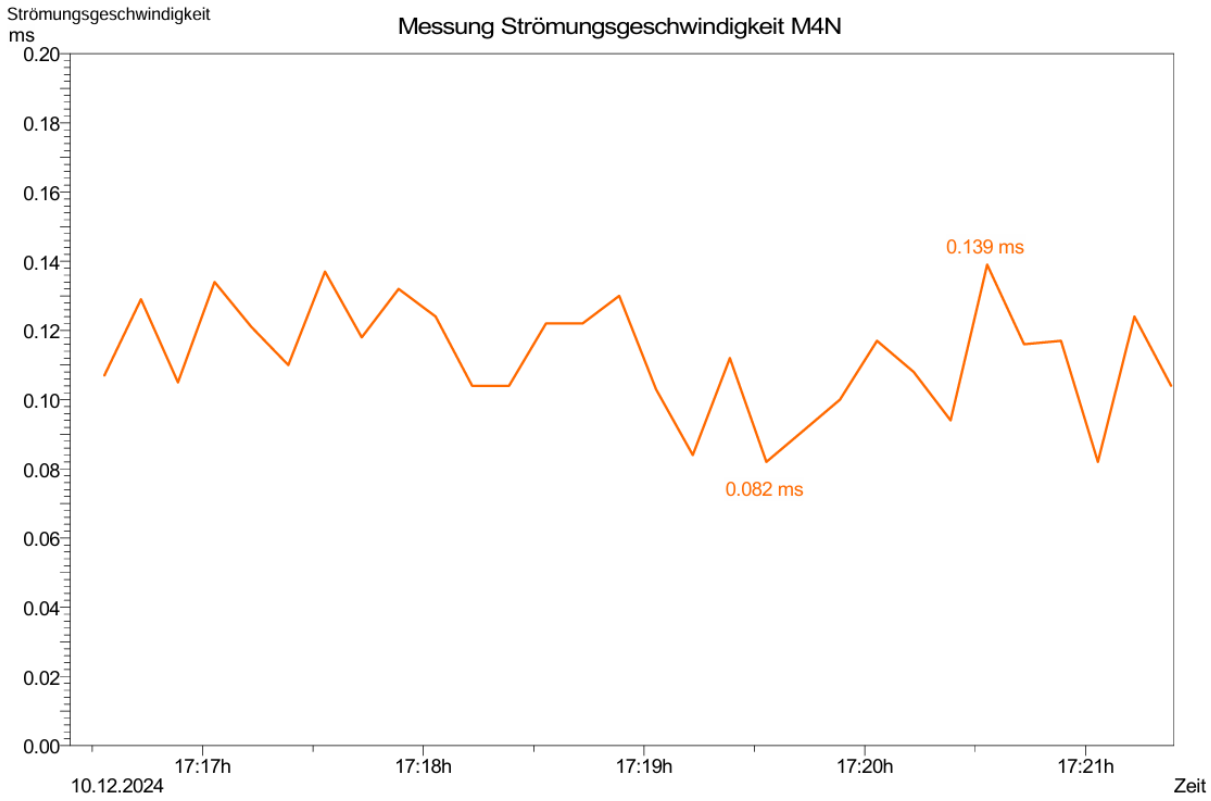

Abbildung 38 Messung Strömungsgeschwindigkeit M4N

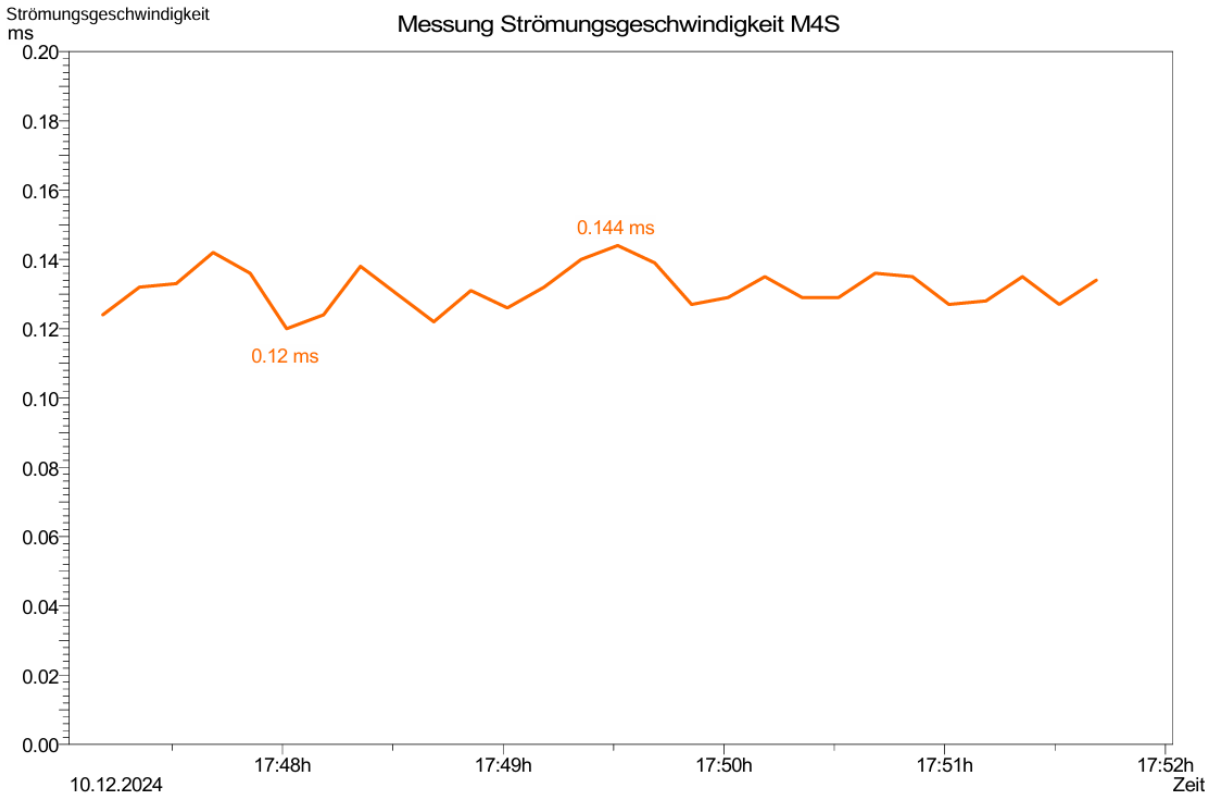

Abbildung 39 Messung Strömungsgeschwindigkeit M4S

Die folgenden Mittelwerte wurden aus den Messdaten berechnet:

- Abluft: 0,868 Meter pro Sekunde
- $M4_S$: 0,419 Meter pro Sekunde
- $M4_N$: 0,111 Meter pro Sekunde

Mit Hilfe der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten kann über die folgende Formel 1 ein ungefährer Volumenstrom berechnet werden. Da die Messungen jedoch nicht direkt im Querschnitt selbst durchgeführt werden konnten, ist die Berechnung des Volumenstroms nur eine Annäherung und nicht exakt. Die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit kann je nach Position im Querschnitt variieren, was zu einer Unsicherheit in der Berechnung führt.

Formel 1 Berechnung Volumenstrom

$$\dot{V} = c * A * 3600 \quad in\ [\frac{m^3}{h}]$$

Die folgende Tabelle 5 fasst die Berechnung der Volumenströme zusammen:

Messpunkt	Strömungsgeschw. [m/s]	Querschnitt [m²]	Volumenstrom [m³/h]
Abluft	0,868	0,00785	24,53
$M4_N$	0,419	0,05292	79,82
$M4_S$	0,111	0,05292	21,15

Tabelle 5 Zusammenfassung Berechnung Volumenstrom

Im zweiten Teil des Experiments wurde mithilfe eines Blasebalgs Nebel in das Umluftsystem eingebracht, um die Strömungsverteilung innerhalb der Vitrine visuell darzustellen. Der Nebel repräsentierte einen Wärmestau, der abgeführt werden muss, um die Temperaturverhältnisse im System zu stabilisieren.

Hierfür wurde vor dem Rohreinschubventilator über eine kleine Öffnung der Nebel hinzugeführt. Nach der Aufzeichnung der Strömungsverteilung innerhalb der Vitrine wurde der Ventilator gelockert, sodass er den Nebel in den umliegenden Raum fördern konnte. Auf diese Weise konnte visuell beobachtet werden, wie sich der Nebel in Richtung der Abluftöffnung bewegte. Alle Aufzeichnung dazu sind in der Anlage 5.3 zu finden.

Zudem wurde das Referenzobjekt als Strömungsindikator im Betrieb des Umluftsystems getestet. Die Aufzeichnung hierfür befindet sich in der Anlage 5.4.

7 Auswertung Messdaten und Fazit

Die Auswertung der Messdaten erfolgt zunächst mit dem Fokus auf das Umluftsystem und die Analyse der Strömungsverteilung. Im Anschluss werden die Temperaturmessungen an der Kühleinheit ausgewertet.

- Umluftsystem

Wie in Kapitel 4.1 definiert, darf die Strömungsgeschwindigkeit auf der Zuluftseite maximal ein Meter pro Sekunde betragen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass diese Anforderung an den Zuluftkästen vollständig erfüllt wurde (s. Tabelle 5).

Im Verlauf der Untersuchung wurde festgestellt, dass die vorhandene Abluftgeschwindigkeit als ausreichend bewertet werden kann. Das System zeigt jedoch zwei Punkte auf, die als problematisch einzustufen sind.

- Das Umluftsystem funktioniert nicht, sobald die Objekttischplatte aufgelegt wird, da die Abluftschlitze zu klein dimensioniert sind, was zu einem Strömungsabriss führt. Auch die eingebrachten Löcher konnten keine Verbesserung bewirken (s. Anlage 5.5). Daher wurde die Objekttischplatte vor allen weiteren Messungen entfernt. Eine mögliche Lösung könnte darin bestehen, die Objekttischplatte als Lochblech auszugestalten, um eine höhere Durchlassrate zu gewährleisten. Alternativ könnte auch die Anordnung der Abluft entsprechend angepasst werden.
- Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten treten nur auf, wenn sowohl der CPU-Lüfter auf der kalten Seite als auch der Rohreinschubventilator mit voller Leistung betrieben werden. Dies steht jedoch im Widerspruch zu einem effizienten Wärmeübergang vom Kühlkörper der kalten Seite an die Luft. Zur Lösung dieses Problems wäre eine Neudimensionierung des Rohreinschubventilators erforderlich, um die Druckverluste im System auszugleichen, sodass der Einsatz des CPU-Lüfters entfallen kann. Alternativ könnte auch die Integration eines zweiten Lüfters im Abluftstrang in Betracht gezogen werden.

Der Traumfänger, der als Strömungsindikator fungierte, zeigte keine nennenswerte Bewegung. Bei genauerer Beobachtung konnten zwar kleine Bewegungen festgestellt werden, jedoch waren diese kaum wahrnehmbar, sodass das Referenzobjekt als unbewegt betrachtet wird. Daraus lässt sich schließen, dass mit dem vorliegenden Umluftsystem eine laminare Quelllüftung erreicht wurde.

Die Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme visualisieren die Leistungsabweichungen von technischen Anlagenkomponenten. Der Verlauf der jeweiligen Datenlinien zeigt, dass die Strömungsgeschwindigkeiten schwanken, was bei der angestrebten laminaren Quelllüftung berücksichtigt werden muss.

Über die Videodokumentation des Nebels in der Vitrine konnte verfolgt werden, wie dieser über die Zuluftkästen in die Vitrine strömte. An manchen Stellen kann man erkennen, wie die Zuluft wie geplant erst nach oben steigt, langsam wieder absinkt und dann vom Abluftstutzen angesogen wird. Dennoch stellt sich keine eindeutige Coander-Strömung ein. Hierfür wäre eine leichte Schrägstellung nach Außen der Zuluftkästen hilfreich gewesen.

Die relative Luftfeuchte im Laborraum lag bei 26 bis 28 Prozent. Das Referenzexponat benötigt jedoch eine relative Feuchte von 45 bis 50 Prozent. Die Laborbedingen treffen auf das SMAC nicht zu, jedoch muss das System flexibel sein, um auf Veränderungen gut zu reagieren. In diesem Fall wäre eine Befeuchtung der Luft notwendig gewesen, welche zum jetzigen Stand der Anlage überhaupt nicht berücksichtigt wurde. Hierfür könnte das Feuchtekonstantgerät der Firma miniClima ins Anlagensystem integriert werden. Eine Leihgabe des SMACs des Modells EBC10 war zwar vorrätig, konnte jedoch aufgrund von Zeitmangel nicht mehr im Aufbau aufgenommen werden.

Die Messdaten der Strömungsgeschwindigkeit und der errechneten Volumenströme zeigen, dass keine Symmetrie im Zuluftstrom vorhanden ist. Hier muss ein Abgleich der einzelnen Stränge erfolgen, um eine gleichmäßige Quelllüftung innerhalb der Vitrine zu erhalten. Aufgrund der hohen Druckverluste der Alu-Flex-Rohre sollte diese durch ein Rundrohrsystem ersetzt werden.

- Kühleinheit

Alle Messungen der Temperaturen an der Kühleinheit zeigen ein eindeutiges Ergebnis:

Das errichtete Kühlmodul ist in der Lage von der Eingangstemperatur auf eine gewisse Ausgangstemperatur zu kühlen. Jedoch konnte das System zu keinem Zeitpunkt die erforderlichen 17°C Lufttemperatur erreichen.

Die Daten zeigen ebenfalls, dass ein Peltier-Element mit 72 Watt Leistung bei einem Stromfluss von 5,3 Ampere nicht ausreichend dimensioniert ist. In diesem Fall sollte geprüft werden, ob eine größere Dimensionierung des gesamten Kühlmoduls sinnvoll ist oder ob eine Kaskadenkühlung in Betracht gezogen werden sollte. Bei Letzterem wäre zu beachten, dass ein zusätzlicher Regler oder ein anderes Modell mit mehreren Regelkreisen erforderlich wäre. Zudem müssten bei leistungsstärkeren Peltier-Elementen neue leistungsstärkere Netzteile beschafft werden.

Geplant war es, dass der CPU-Lüfter am Kühlkörper der kalten Seite dafür sorgt, dass der Luftstrom gleichmäßig über die Lamellen transportiert wird. Jedoch ist durch die Messung 3 ersichtlich geworden, dass nur mit der geringsten Drehzahl, ergo einer niedrigen Strömungsgeschwindigkeit der Luftstrom effizient gekühlt wird (rein physikalisches Prinzip nachgewiesen). Zudem sind CPU-Lüfter für eine schnelle Abführung von Abwärme konzipiert, dies wurde in der Entwurfsplanung nicht beachtet.

Die Nutzung des Lüfters ist wie im Unterpunkt „Umluftsystem“ beschrieben nicht möglich. Eine Umpositionierung des Lüfters in das Abluftrohr / zum Abluftstutzen wäre eine denkbare Alternative, welche zu einer neuen Messreihe geführt hätte.

Abschließend lässt sich feststellen, dass das Umluftsystem insgesamt sehr gut funktioniert, jedoch an einigen Stellen noch Optimierungspotential besteht. Mit der Kühleinheit konnte nachgewiesen werden, dass mit diesem Kühlmodulaufbau eine Kühlung möglich ist. Für den vorliegenden Anwendungsfall wurde das System jedoch als zu klein dimensioniert. Daher ist eine Neudimensionierung der einzelnen Komponenten erforderlich, um die Leistung und Effizienz des Systems zu verbessern.

Quellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Sofern nicht anders in der untenstehenden Tabelle angegeben, stammen alle Abbildungen in dieser Arbeit aus eigener Anfertigung.

Nr.	Datum	Quelle
2	23.10.2024	https://www.energie-lexikon.info/peltier_element.html Grundlage + eigene Erweiterung

Tabellenverzeichnis

Alle aufgeführten Tabellen in dieser Arbeit stammen aus eigener Anfertigung.

Literaturverzeichnis

Nr.	Quelle	Datum
[1]	Studienarbeit, Julia Stenzel	30.09.2024
[2]	https://www.meerstetter.ch/de/kundencenter/kompendium/70-peltier-elemente?srsltid=AfmBOooEe1WKpgoksAQTFILuh8XTOX173P_pXkK7jHLt0f2QVmfmjaZd	23.10.2024
[3]	https://global.kyocera.com/prdct/ecd/peltier/	23.10.2024
[4]	https://de.rs-online.com/web/content/discovery-portal/produktratgeber/potentiometer-leitfaden?srsltid=AfmBOoqLEEybJS_dzbuQkqQF3DRszzixoHRdApfVF6ZuVHp0PwpASzOq	24.11.2024
[5]	Trogisch, A., Reichel, M. Planungshilfen der Lüftungstechnik, 7. Auflage, Berlin, VDE Verlag GmbH, 11-2020, Kap. 2.10	

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit mit dem Thema:

„Aufbau einer Versuchseinrichtung und Messungen zur Untersuchung der Vorgänge innerhalb einer Vollglasvitrine“

selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommene Gedanken habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die vorliegende Arbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt. Sie wurde bisher auch nicht veröffentlicht.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Stenzel, Julia Sophy

Name, Vorname Verfasser

Halle (Saale), 13.12.2024

Ort, Datum

Unterschrift Verfasser

Anlagenverzeichnis

Alle Anlagen werden dem Prüfer in digitaler Form zur Verfügung gestellt.

Anlagenpaket 1 – Allgemeines

Anlage 1.1	Umbauprotokoll
Anlage 1.2	Schriftverkehr Angebot MBI - 14147

Anlagenpaket 2 – Zeichnungen

Anlage 2.1	Bemaßung Vitrine
Anlage 2.2	Schematischer Aufbau der Messpunkte M1 und M2
Anlage 2.3	schematischer Aufbau PE mit Regler
Anlage 2.4	schematischer Aufbau Umluftsystem

Anlagenpaket 3 – Fotodokumentation

Anlage 3.1	Fotodokumentation nach Abbildungsverzeichnis
Anlage 3.2	Fotosammlung Dieser Ordner enthält alle weiteren Fotos die benannt oder ohne weitere Verwendung aufgenommen worden sind.

Anlagenpaket 4 – Messdokumentation

Anlage 4.1	Messung 1 Temperatur
Anlage 4.2	Messung 2 Temperatur
Anlage 4.3	Messung 3 Temperatur
Anlage 4.4	Messung 4 Temperatur
Anlage 4.5	Messung 5 Temperatur

Anlagenpaket 5 – Videodokumentation

Anlage 5.1	Reglerparameter Änderung
Anlage 5.2	Fehlerhafte Regelung Netzteil
Anlage 5.3	Visualisierung der Strömung
Anlage 5.4	Strömungsindikation Referenzobjekt

Anlage 5.5 Visualisierung Strömung Objekttischplatte

Anlagenpaket 6 - Datenblätter

Anlage 6.1 Bedienungsanleitung QC-PC-D-CH1

Anlage 6.2 Datenblatt Controller

Anlage 6.3 Datenblatt Display

Anlage 6.4 Datenblatt QC-SW-DPC-01