

BACHELORARBEIT AUS DER PHYSIK

---

# Entwicklung eines SingleCCD-Gehäuse-Prototypen im Hinblick auf thermische Eigenschaften

---

Vorgelegt von

Philipp Hofmann

29.6.2015

FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG



Betreuer: Prof. Dr. Christopher van Eldik  
Zweitkorrektor: Prof. Dr. Gisela Anton



## Zusammenfassung

Das Cherenkov-Telescope-Array, kurz CTA, ist ein in der Planungsphase befindliches Instrument zur bodengebundenen Gammaastronomie. Mit einem verbesserten Aufbau und einer effektiven Detektionsfläche von  $3\text{ km}^2$  wird die Sensitivität, die Winkelauflösung sowie die Energiebereichabdeckung von CTA den derzeitigen Cherenkov-Teleskopen überlegen sein. Um eine präzise Richtungsrekonstruktion zu gewährleisten, ist es essentiell, das Pointing, die Ausrichtung beziehungsweise Blickrichtung der Teleskope zu kennen. Hierzu wird in der Spiegelebene eine optische CCD-Kamera montiert werden, die sowohl den Nachthimmel als auch die Position der Cherenkov-Kamera aufzeichnet. Aus den entstandenen Bildern lässt sich anschließend auf die exakte Ausrichtung der Teleskope schließen.

Da die CCD-Kamera im Freien angebracht sein wird, gilt es ein Gehäuse zu entwickeln, das sie vor Witterungseinflüssen schützt. In dieser Arbeit wurden die thermischen Eigenschaften eines bereits existierenden Gehäuseprototypen auf die Apogee Aspen CG8300 CCD-Kamera und die Anforderungen von CTA angepasst. Im Zuge dieser Arbeit ist es gelungen ein Gehäuse zu entwickeln, das den Einsatz der Aspen CG8300 bei CTA ermöglicht.

## Abstract

The Cherenkov-Telescope-Array (CTA) is a future instrument for ground-based cosmic gamma-ray observation. With an improved setup and an effective detection area of  $3\text{ km}^2$  CTA will provide a higher sensitivity, a better angular resolution and a wider energy range than current Cherenkov telescopes. To ensure an accurate localisation of gamma-sources it is crucial to know the exact pointing of the telescopes. Therefore an optical CCD camera is mounted in the mirror plane to observe the night sky and the position of the Cherenkov camera simultaneously. Based on the taken pictures it is possible to infer the exact pointing.

Because the CCD camera will be mounted outdoors, it is necessary to develop a housing which protects the camera from weather. Within this bachelor thesis the thermal characteristics of an existing housing prototype was fitted to the Apogee Aspen CG8300 CCD camera and the requirements of CTA. As a result a housing was designed that enables the use of the Aspen CG8300 at CTA.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Höchstenergie-Gammaastronomie . . . . .	1
1.2	CTA - Cherenkov-Telescope-Array . . . . .	2
1.3	Pointing . . . . .	3
1.3.1	Standard Pointing . . . . .	3
1.3.2	Precision Pointing . . . . .	4
1.3.3	SingleCCD Konzept . . . . .	4
1.4	CCD-Kamera . . . . .	4
1.5	Wärmeleitung . . . . .	5
1.6	Ziel der Arbeit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Aufbau</b>	<b>8</b>
2.1	Kamera - Apogee Aspen CG8300 . . . . .	8
2.2	Ansteuerung . . . . .	8
2.3	Kameragehäuse . . . . .	9
2.3.1	Anforderungen . . . . .	9
2.3.2	Design und Entwicklung . . . . .	10
2.4	Temperaturmessung - Voltcraft PL-125-T4USB VS . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>12</b>
3.1	CCD- und Heatsinktemperatur . . . . .	12
3.2	Voltcraftungenauigkeiten . . . . .	13
3.3	Gehäusetemperaturen einzelner Prototypen . . . . .	14
3.3.1	Erster Gehäuseprototyp . . . . .	14
3.3.2	Konfiguration A - Kupferrohre . . . . .	17
3.3.3	Konfiguration B - Gekürzte Kupferrohre . . . . .	20
3.3.4	Konfiguration C - Kühlkörper . . . . .	22
3.3.5	Konfiguration D - Kühlrippen . . . . .	24
3.3.6	Konfiguration E - Montagesscheibe . . . . .	25
3.3.7	Sonneneinstrahlung . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>30</b>
<b>A</b>	<b>Datenblätter</b>	<b>32</b>
A.1	Kamera . . . . .	32
A.2	Voltcraft . . . . .	34
<b>B</b>	<b>Konstruktionsplan</b>	<b>35</b>



# 1 Einführung

## 1.1 Höchstenergie-Gammaastronomie

Unter Höchstenergie-Gammaastronomie versteht man die Astronomie, die sich mit der energiereichsten Form kosmischer Gammastrahlung befasst. Hierbei ist die Rede von Energien bis zu 100 TeV. Gammastrahlung entsteht sowohl an kosmischen Beschleunigern, den Quellen kosmischer Strahlung, als auch durch Kollision dieser Teilchenstrahlung mit interstellaren Gaswolken. Der Teilchenfluss kosmischer Strahlung folgt einem Potenzgesetz. Bei hohen Energien nimmt er stark ab (Bietenholz, 2013). Im Gegensatz zur geladenen kosmischen Strahlung wird die elektrisch neutrale Gammastrahlung nicht durch interstellare Magnetfelder abgelenkt und zeigt somit auf die Quellposition. Die Quellen kosmischer Strahlung gilt es genauer zu untersuchen. Die Entstehung der Gammastrahlung wird vom neutralen Pion Zerfall  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  und dem inversen Comptoneffekt dominiert. Aufgrund der Beziehung zur kosmischen Strahlung folgt auch der Fluss an Gammaquanten einem Potenzgesetz und nimmt bei hohen Energien stark ab.

Gammastrahlung lässt sich mittels Satelliten, wie zum Beispiel FERMI, messen. Aufgrund der technisch limitierten Nachweisfläche und des sinkenden Flusses eignet sich diese satellitengestützte Detektion nur bis Energien von  $\sim 300$  GeV (Atwood et al., 2009). Für höhere Energien weicht man auf die erdbasierte Gammastrahlen-Astronomie aus.

Trifft ein kosmisches Gammaquant auf die Erdatmosphäre, so tritt es in Wechselwirkung mit den dortigen Atomen, eine direkte Detektion auf der Erdoberfläche wird unmöglich. Bei dieser Wechselwirkung erzeugt ein primäres, hochenergetisches Gammaquant zunächst ein Elektron-Positron-Paar. Diese Teilchen senden nun durch Bremsstrahlung und Annihilation weitere Gammaquanten aus. Durch ständige Wiederholung dieser Prozesse kommt es zur Ausbildung einer Kaskade, auch Teilchenschauer genannt. Aufgrund der hochrelativistischen Elektronen und Positronen entsteht Cherenkov-Strahlung<sup>1</sup>. Wird diese mittels Cherenkov-Teleskopen detektiert, so lassen sich Rückschlüsse auf Richtung und Energie des Primärteilchens ziehen. Cherenkov-Teleskope sind Spiegelteleskope, welche das Cherenkov-Licht in eine Kamera, bestehend aus Photomultipliern, fokussieren. Die Spiegelfläche eines einzelnen Teleskops kann dabei bis zu  $614 \text{ m}^2$  (H.E.S.S. II<sup>2</sup> (Deil et al., 2008)) betragen. Das Cherenkov-Telescope-Array, kurz CTA, wird eines dieser Cherenkov-Teleskope sein, befindet sich aktuell jedoch noch in der Planungsphase.

---

<sup>1</sup>Bläuliche Leuchterscheinung, die entsteht, wenn sich geladenen Teilchen im Dielektrikum schneller als die dortige Phasengeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen bewegen.

<sup>2</sup>High Energy Stereoscopic System

## 1.2 CTA - Cherenkov-Telescope-Array

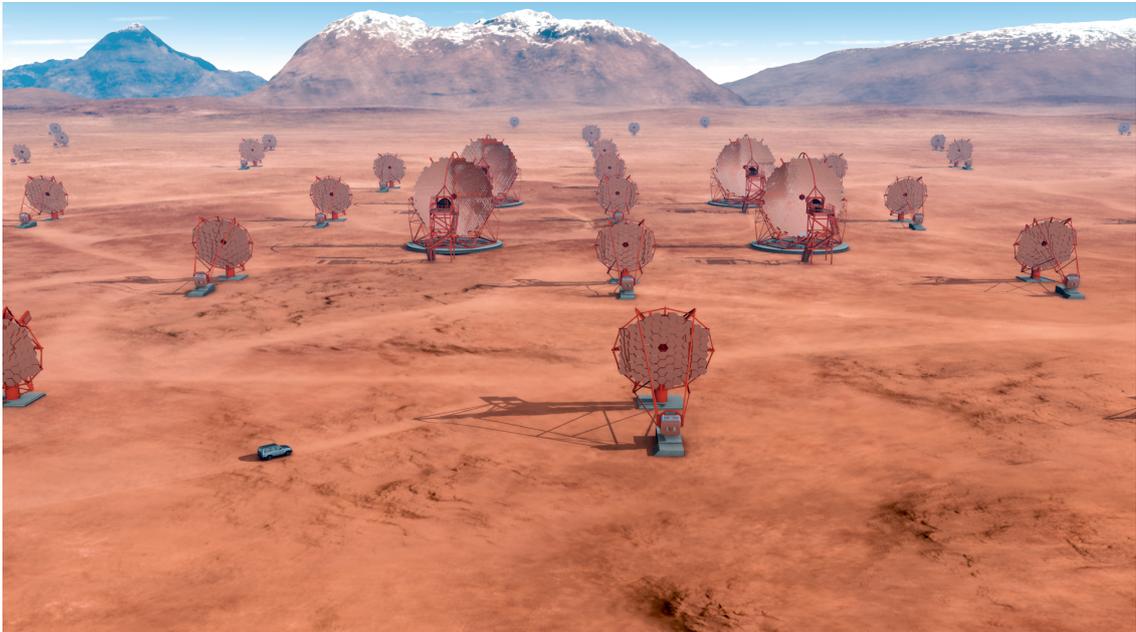


Abbildung 1.1: Entwurf eines denkbaren Cherenkov-Telescope-Array-Layouts (Astro.desy.de, 2015).

Das Cherenkov-Telescope-Array wird auf zwei Standorte aufgeteilt (Actis et al., 2011). Ein Array soll sich auf der südlichen, eins auf der nördlichen Halbkugel befinden, womit der gesamte Himmel beobachtet werden kann. Das südliche Array wird primär für die Observation der galaktischen Ebene ausgelegt, das nördliche für die Entdeckung extragalaktischer Quellen. Für die Observation der galaktischen Ebene ist eine Abdeckung des Energiespektrums von etwa 10 GeV bis 100 TeV, für das nördliche Array eine Energiesensitivität von 10 GeV bis 10 TeV vorgesehen. Um diese Energien abzudecken, werden im Süden drei Teleskopgrößen verbaut: das Large- (LST), das Medium- (MST) und das Small-Size-Telescope (SST). Die unterschiedlichen Teleskopgrößen lassen sich verschiedenen Energiebereichen zuordnen. Im Niederenergiebereich bis etwa 100 GeV erfordert die geringe Anzahl an Cherenkov-Photonen eine große effektive Spiegelfläche. Das Errichten vieler kleiner Teleskope stellt die kostengünstigste Lösung dar, erschwert aufgrund geringer Photonenzahlen pro Teleskop jedoch die Signaltriggerung (Actis et al., 2011).

Aus diesem Grund entschied man sich für wenige große Teleskope, die LSTs, mit Spiegeldurchmessern von ca. 24m. Mit steigender Energien der Primärteilchen nimmt die Anzahl ausgesandter Cherenkov-Photonen zu, die Spiegelfläche pro Teleskop kann verkleinert werden. Für den

Hauptenergiebereich von 100 GeV bis 10 TeV ergeben sich so Spiegeldurchmesser von 10 bis 15 m. Die Anforderungen an den dritten, den Hochenergiebereich sind maßgeblich durch einen geringen Fluss an Gammaquanten vorgegeben. Um diesen zu kompensieren, ist eine große effektive Detektionsfläche nötig, die mithilfe vieler kleiner Teleskope, den SSTs erreicht wird. Small-Size-Teleskope werden voraussichtlich Spiegeldurchmesser von wenigen Metern aufweisen.

Da im Norden keine Strahlung oberhalb etwa 10 TeV detektiert werden soll, beschränkt sich der Aufbau dort auf die Teleskope LST und MST. Auch die Anzahl an Teleskopen variiert je nach Array. So sind für den Süden 70-100 Teleskope auf einer Fläche von 3 bis 4 km<sup>2</sup> vorgesehen. Für den Norden 20-30 auf einer Fläche von 0,4 bis 1 km<sup>2</sup>. Der Flächenunterschied beruht auf den unterschiedlichen zu untersuchenden Energien beider Arrays. Aufgrund des fallenden Flusses für höhere Energien benötigt das südliche Array eine größere effektive Detektionsfläche. Von CTA erhofft man sich eine Verbesserung in mehreren Bereichen gegenüber bereits existierender Teleskope. Zu den wichtigsten Aspekten zählen Sensitivität, Winkelauflösung und Energieauflösung. Mit diesen verbesserten Spezifikationen erwartet man, die etwa 150 bisher gefundenen Gammaquellen um weitere tausend zu ergänzen und daraus ein genaueres Verständnis von kosmischen Beschleunigern zu erlangen (Actis et al., 2011).

## 1.3 Pointing

Um einen Schauer exakt rekonstruieren zu können, ist es essentiell, die genaue Ausrichtung beziehungsweise die Blickrichtung, das sog. Pointing der einzelnen Teleskope zu kennen. Mis-Pointing, eine fehlerhafte Ausrichtung des Teleskops zählt dabei zu den dominanten systematischen Fehlern der Richtungsrekonstruktion der Gammastrahlungsphotonen (Eschbach, 2014). Obwohl die Nachführung des Teleskops eine Genauigkeit von wenigen Bogensekunden zuließe, kommt es maßgeblich durch Verformung von Spiegelfläche und Kameraaufhängung sowie durch einen Offset oder ein Verkippen der Teleskop-Achsen zu Abweichungen von bis zu einigen Bogenminuten (Herpich, 2010). Es existieren mehrere Möglichkeiten, um diese Abweichungen zu bestimmen und dadurch den systematischen Fehler zu minimieren. Diese sollen im Folgenden vorgestellt werden.

### 1.3.1 Standard Pointing

Beim Standard Pointing wird eine optische CCD<sup>3</sup>-Kamera, die sogenannte *LidCCD* in der Spiegelmitte jedes Teleskops angebracht. Am Rand der Cherenkov-Kamera befinden sich sogenannte *Pointing LEDs* (s. Abb. 1.2a). Wird der Deckel der

---

<sup>3</sup>Charge Coupled Devices

Cherenkov-Kamera geschlossen, so wird der Ausschnitt des betrachteten Sternenhimmels darauf abgebildet. Das Abbild der Sterne samt Pointing LEDs wird von der LidCCD-Kamera aufgezeichnet, womit sich auf die Blickrichtung des Teleskops und die Position der Kamera schließen lässt. Für mehrere anvisierte Positionen lässt sich so für jedes Teleskop ein Modell des Mis-Pointings erstellen. Der Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass sie eine geschlossene Cherenkov-Kamera erfordert und so das Teleskop nicht zur Schauerdetektion eingesetzt werden kann. Dies ist problematisch, da sich das Mis-Pointing aufgrund von Temperaturschwankungen und inelastischen Verformungen zwischen den Messungen verändert.

### 1.3.2 Precision Pointing

Precision Pointing ermöglicht die simultane Messung von Cherenkov-Strahlung und Pointing. Bei dieser Methode wird mit einer zweiten CCD-Kamera, die außerhalb der optischen Achse des Teleskops montiert ist, der Nachthimmel beobachtet. So lässt sich über die Pointing LEDs mittels LidCCD die Position der Cherenkov-Kamera bestimmen, während die zweite CCD-Kamera, die *SkyCCD*, die Beobachtungsrichtung des Teleskops angibt (s. Abb. 1.2a). Die Kombination von Sky- und Lid-CCD wird auch Sky-Lid-Modell genannt (Lennarz, 2012).

### 1.3.3 SingleCCD Konzept

Ein alternativer Aufbau des Precision Pointings ist die Vereinigung von LidCCD- und SkyCCD-Kamera zu einer Kamera. Dieses Konzept nennt man *SingleCCD-Konzept*. Im Blickfeld dieser Kamera, der sogenannten SingleCCD, liegt sowohl die Cherenkov-Kamera samt Pointing LEDs als auch der Nachthimmel (vgl. Abb. 1.2b). Neben dem Einsparen einer CCD-Kamera ist ein weiterer Vorteil dieser Methode die Elimination von Fehlerquellen, welche aufgrund von unterschiedlichen Positionen und Ausrichtungen zweier Kameras auftreten (Herpich, 2010).

## 1.4 CCD-Kamera

Das Herzstück einer CCD-Kamera ist ihr lichtempfindlicher CCD-Chip. Der Bildsensor besteht aus einem Array an Photodioden. Eine einzelne Photodiode entspricht einem Siliziumhalbleiter mit einer Bandlücke von 1,14 eV und kommt einem Pixel auf dem CCD-Chip gleich. Aufgrund der Bandlücke kann ein Photon aus dem sichtbaren Spektrum absorbiert werden und mittels innerem photoelektrischem Effekt ein oder mehrere Elektron-Loch-Paare erzeugen. Die Elektronen werden dabei aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben. Je höher die Energie des einfallenden Photons, desto mehr Elektronen-Loch-Paare können erzeugt und Elektronen in das Leitungsband gehoben werden. Silizium ist dabei sensitiv auf

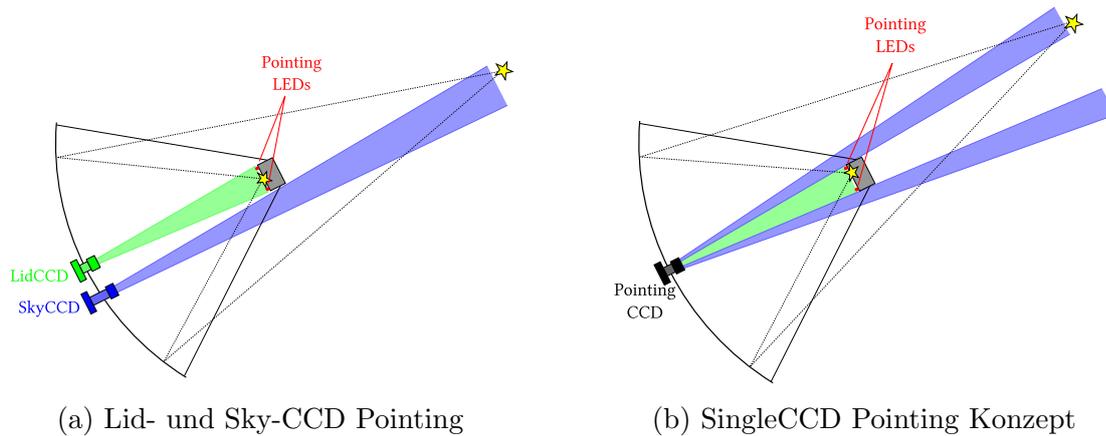


Abbildung 1.2: Schematischer Pointing-Aufbau: (a) LidCCD: Beobachtung der Cherenkov-Kamera via Pointing LEDs. SkyCCD auf Sternenhimmel gerichtet. Kombination beider Kamerabilder liefert Teleskop-Pointing. (b) LidCCD und SkyCCD in SingleCCD vereint. Simultane Observation von Cherenkov-Kamera und Sternenhimmel (Herpich, 2010).

Photonen zwischen 1,1 und etwa 10 eV, für Photonen außerhalb dieses Energiespektrums wirkt die Photodiode durchsichtig (Howell, 2006). Ein Pixel ist somit in der Lage, die Energie des einfallenden Lichts in elektrische Ladung zu konvertieren. Um eine Rekombination des Photoelektrons aus dem Leitungsband mit dem entstanden Loch im Valenzband zu verhindern, wird der Siliziumhalbleiter um eine Isolatorschicht (z. B. Siliziumoxid) und je nach Aufbau um einen oder zwei Metallkontakte an beiden Seiten erweitert. Ohne auf den genauen Aufbau sogenannter MOS- bzw. MIS-Kondensatoren eingehen zu wollen ist anzumerken, dass der modifizierte Aufbau in Kombination mit einer angelegten Spannung einen Potentialtopf ausbildet. In diesem sammeln sich die Elektronen, bis das jeweilige Pixel ausgelesen wird (Li u. Nathan, 2005).

## 1.5 Wärmeleitung

Da es gilt, die thermischen Eigenschaften eines bereits existierenden Gehäuseprototypen weiterzuentwickeln, ist ein grundlegendes Verständnis der Wärmeleitung notwendig.

Wärmeleitung (oder Konduktion) zählt neben der Konvektion und Wärmestrahlung zu den drei Mechanismen des Wärmetransports. Unter Wärmetransport versteht man dabei im Allgemeinen einen Transport von Wärmeenergie von einem wärmeren in ein kälteres Gebiet. Die Wärmeleitung beschreibt einen an Materie gebundenen,

jedoch ohne Massentransport stattfindenden Wärmetransport. Aus der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung (Demtröder, 2013)

$$\vec{j}_Q = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

mit  $j_Q = \frac{\dot{Q}}{A}$  der Wärmestromdichte,  $\dot{Q}$  dem Wärmestrom und  $\lambda$  der Wärmeleitfähigkeit folgt nach Integration für einen homogenen Leiter im stationären Zustand mit konstantem Querschnitt  $A$  und konstanten Randtemperaturen  $T_1, T_2$  mit  $T_1 > T_2$  (s. Abb. 1.3)

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{L} A (T_1 - T_2) \quad (2)$$

mit  $L$  der Länge des Leiters. In diesem vereinfachten Modell wird vernachlässigt,

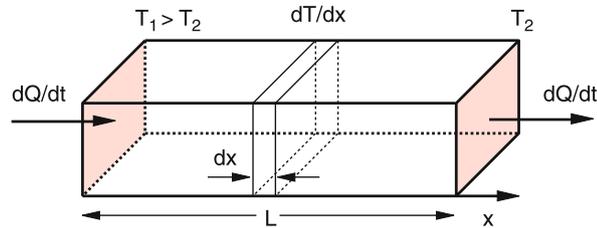


Abbildung 1.3: Wärmeleitung in einem Stab (Demtröder, 2013).

dass der Stab über mögliche Wärmeleitung oder Wärmestrahlung im thermischen Kontakt mit der Umgebung steht.

Man kann die Wärmeleitung innerhalb eines Körpers und an dessen Grenzflächen betrachten. Unter Grenzfläche versteht man die Kontaktflächen zwischen zwei Substanzen. Diese Kontaktfläche kann zwischen Festkörpern, Festkörper und Fluid oder zwischen zwei Fluiden auftreten. Der Wärmeübergang ist über die Formel

$$\dot{Q} = \alpha A (T_1 - T_2), \quad (3)$$

mit  $\alpha$  (engl.  $h$ ) dem Wärmeübergangskoeffizient, definiert. Relevant ist diese Art des Wärmetransports an sämtlichen Grenzflächen mit Temperaturunterschieden. Soll beispielsweise der Wärmetransport von einem geheizten Zimmer über die Hauswand an die Außenluft berechnet werden, so müssen neben der Wand die beiden Grenzflächen Innenluft-Wand und Wand-Außenluft berücksichtigt werden. Der Wärmeübergangskoeffizient ist eine Zusammenfassung vieler, den Wärmeübergang beeinflussender Parameter. Zu diesen Parametern zählen beispielsweise die Oberflächenbeschaffenheit und der Anschluss der Grenzflächen, sowie die Aggregatzustände beider Materialien zwischen denen der Wärmeübergang stattfindet. Für

Flüssigkeiten und Gase im Kontakt mit einem Feststoff wird der Wärmeübergangskoeffizient maßgeblich von der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Art der Strömung beeinflusst. Hinzu kommt die Lage der Kontaktfläche zur Strömungsrichtung.

Der  $\alpha$ -Wert lässt sich mittels empirischer Formeln berechnen. Da sich die Rechnung bereits für einfache Fallvorgaben als aufwendig und das Ergebnis als fragwürdig erweist, wird häufig auf fallspezifische Messwerte zurückgegriffen. Für den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Metall und ruhende Luft wird ein Wert zwischen 5 und  $10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ , für eine Strömungsgeschwindigkeit von  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ein Wert zwischen 45 und  $70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  empfohlen (Böge, 2011).

Genauere Betrachtung der Formeln (1), (2) und (3) lassen die Analogie zum elektrischen Strom erkennen. Die Wärmestromdichte  $\vec{j}_Q$  kommt dabei der elektrischen Stromdichte  $\vec{j}$  gleich. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  bildet das Pendant zum elektrischen Strom  $I$ . In diesem Bild folgt daraus die Äquivalenz von  $\Delta T$  mit dem elektrischen Spannung  $U$ . Somit bilden  $\frac{\lambda}{L}A$  und  $\alpha A$  Leitwerte des Wärmestroms. Die Aufheizung eines Systems bis zur Einstellung eines konstanten Wärmestroms entspricht einer Kapazität: Im Material wird Wärmeenergie gespeichert, wodurch es sich aufwärmt. Kühlt das System ab, wird die eingebrachte Energie an die Umgebung abgegeben. Mittels dieses Vergleichs lässt sich der Wärmestrom  $\dot{Q}$  für zusammengesetzte Systeme analog zum elektrischen Strom von Schaltungen berechnen (s. Abschn. 3.3).

## 1.6 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit sollen die einzelnen Entwicklungsstufen eines SingleCCD-Kamera-Gehäuses für CTA erläutert werden. Dabei gilt es, die Anforderungen von CTA an seine Komponenten zu erfüllen. Zu den notwendigen Eigenschaften zählen sowohl ein wartungsfreier Aufbau sowie Beständigkeit gegen genau definierte Umwelteinflüsse. Als größte Schwierigkeit stellte sich im Laufe der Arbeit heraus, das Gehäuse wetterfest zu machen und gleichzeitig im Gehäuseinneren auch für die für CTA spezifizierte maximale Umgebungstemperatur die Betriebstemperatur der Kamera nicht zu überschreiten. Deshalb wurde das Kamera-Gehäuse auf seine Wärmeleitfähigkeit überprüft und schrittweise weiterentwickelt.

## 2 Aufbau

### 2.1 Kamera - Apogee Aspen CG8300

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um die astronomische Kamera Aspen CG8300 von Apogee Imaging Systems. Diese weist laut Hersteller folgende Spezifikationen auf. Als Herzstück besitzt die CCD-Kamera einen monochromatischen Kodak KAF-8300 CCD-Chip mit einer Auflösung von 3326x2504 Pixel (8-Megapixel) auf den Abmessungen 18x13.5 mm. Um thermisches Rauschen zu minimieren, lässt sich der Chip mittels aktiver Kühlung auf 60 K unter die Umgebungstemperatur kühlen. Die Kühlung erfolgt durch ein Peltier-Element<sup>4</sup> (s. Abb. 3.4), dessen Abwärme über einen 10,5x10,5x3,0 cm großen Stiftkühlkörper (belüftet von zwei 5,8 cm Ventilatoren) an die Umgebungsluft abgegeben wird. Ebenfalls ist die CCD-Kamera mit einem laut Herstellerangaben höchst zuverlässigen Iris-Shutter für mehr als fünf Millionen Zyklen ausgestattet. Für die Datenübertragung weist die Kamera eine Ethernet-Schnittstelle auf. Da USB mit ca. 5 m eine deutlich kürzere maximale Kabellänge im Vergleich zu Ethernet ( $\geq 100$  m) aufweist, würde die Verwendung eines USB-Kabels eine zusätzliche Verstärkung oder die Konvertierung des Kamerasignals und dadurch weitere Bauteile erfordern. Als Stromversorgung benötigt die Aspen CG8300 eine 12 V DC Stromquelle mit maximal 50 W Leistung. Die Kamera lässt sich laut Hersteller bei Temperaturen zwischen  $-25$  bis  $40^\circ\text{C}$  betreiben. Über Grenztemperaturen im ausgeschalteten Zustand macht Apogee keine Angaben (s. Datenblatt A.2).

Als Objektiv wurde das AF NIKKOR 50 mm f/1.8D von Nikon verwendet.

Die Marke Apogee wurde gewählt, da mit ihr bereits gute Erfahrungen bei den H.E.S.S.-Teleskopen gemacht wurden. Bedauerlicherweise änderte sich dieser Eindruck mit der gelieferten Aspen CG8300. Zu Beginn, nach etwa 20 Verschluss-Zyklen, versagte der Shutter das erste Mal. Eine Reparatur beim Hersteller ermöglichte weitere 20 Verschluss-Zyklen bevor der Shutter das zweite Mal den Dienst einstellte (Specovius, 2014). Außerdem wurde bei Umbaumaßnahmen festgestellt, dass sich einer der beiden Lüfter kaum dreht und im abgeschalteten Zustand einen deutlich spürbaren Widerstand aufweist.

### 2.2 Ansteuerung

Die Kamera wurde über Linux mit dem mitgelieferten Apogee Framework (Version 3.0.3079) angesteuert. Dies erlaubte die Erstellung eigener *C++*-Programme, womit ein automatisches Arbeiten der Kamera ermöglicht wurde. Zum Einsatz kamen maßgeblich zwei Programme. Das erste, das sogenannte *longtemperature.cpp* kühlt den Kamera-Chip auf  $-10^\circ\text{C}$  herunter und lässt die Kamera abwechselnd in zwei

<sup>4</sup>Thermoelektrischer Wandler der mittels Stromfluss als Wärmepumpe fungiert.

verschiedenen Modi arbeiten. Im ersten Modus nimmt die Kamera für dreißig Minuten Darkframes<sup>5</sup> und die Chip-Temperatur auf. Im zweiten Modus, ebenfalls für eine halbe Stunde, wird nur die CCD-Temperatur gespeichert.

Specovius (2014) ermittelte für das verwendete Kameramodell eine ideale CCD-Temperatur von  $-5^{\circ}\text{C}$ . Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Studien wurde eine Chip-Temperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  eingestellt. Die zur idealen Chip-Temperatur um 5 K geringere CCD-Temperatur erfordert eine höhere Kühlleistung, wodurch es zu einer minimal größeren Abwärme des Peltier-Elements kommt. Das Gehäuse wird zur Sicherheit auf eine höhere Abwärme ausgelegt.

Mit dem Programm wird also näherungsweise der Betrieb der Kamera simuliert ohne die Mechanik des Shutters zu beanspruchen. Das Programm speichert sowohl die Dunkelbilder als auch die Temperatur des CCD-Chips und wird so lange ausgeführt, bis es manuell abgebrochen wird. Das zweite Programm *heatupcooldown.cpp* führt für die ersten zehn Stunden die gleichen Operationen wie *longtemperature.cpp* aus. Danach wird die Aufnahme von Darkframes sowie die Kühlung des Chips eingestellt. Die Kamera wird zurückgesetzt, zeichnet jedoch für weitere zehn Stunden die CCD-Temperatur auf, bevor das Programm nach insgesamt zwanzig Stunden selbstständig beendet wird. Dies ermöglicht, sowohl den Aufheizprozess als auch die Abkühlung des Gehäuses über einen langen Zeitraum aufzunehmen.

## 2.3 Kameragehäuse

### 2.3.1 Anforderungen

Da die SingleCCD-Kameras im Freien an den Cherenkov-Teleskopen angebracht werden, gilt es, ein Gehäuse zu entwickeln, das die Kamera vor Witterungseinflüssen schützt. Die CTA-Kollaboration gibt genaue Spezifikationen bezüglich der Umgebungstemperatur und der Umwelteinflüsse vor. Zu unterscheiden ist zwischen Anforderungen, die der Aufbau und die Instrumente des Teleskops unbeschadet zu überstehen haben und Betriebsanforderungen, innerhalb derer das System reibungslos arbeiten soll. Neben der Regen- und Staub- bzw. Sandbeständigkeit sind die Temperaturvorgaben ausschlaggebend für die Entwicklung eines Kameragehäuses. Während der Beobachtung muss die Kamera in einem Umgebungstemperaturbereich zwischen  $-15$  und  $+25^{\circ}\text{C}$  fehlerfrei arbeiten. Außer Betrieb sollen die Instrumente, einschließlich der SingleCCD, Lufttemperaturen von  $-20$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  standhalten. Hinzu kommt eine maximale Sonneneinstrahlung von  $1200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  (Carr, 2013).

---

<sup>5</sup>Dunkelbild: Aufnahme mit geschlossenem Shutter zur Diagnose von Dunkelstrom und thermischem Rauschen

### 2.3.2 Design und Entwicklung

Anfänglich stellte das Kameragehäuse einen Nachbau des LidCCD- und SingleCCD-Gehäuses von H.E.S.S. dar (Gillesen, 2004) (vgl. Abb. 2.1). Dabei wurde die



Abbildung 2.1: LidCCD (mitte) und SingleCCD (unten) mit jeweiligem Gehäuse in der Mitte der Spiegelfläche eines kleinen H.E.S.S. Teleskops (CT2) (Lennarz, 2012).

Kamera in ihrem Originalzustand samt Kühlkörper, Lüftern und Objektiv in einem zylindrischen Aluminiumgehäuse mit Glasdeckel untergebracht. Sowohl Kamera als auch Objektiv sind fest mit der Rückplatte verschraubt, um eine konstante Ausrichtung und Fokussierung zu gewährleisten. Erste Testläufe der Kamera ergaben, dass sich die Luft innerhalb des Gehäuses, bei 25 °C Umgebungstemperatur, auf über 40 °C erwärmen würde, womit die empfohlene Betriebstemperatur der Kamera überschritten wäre (s. Abschn. 3.3.1). Als Hauptursache vermutete man die aktive Luftkühlung des CCD-Chips. Da das Gehäuse wasser- und luftdicht ist, bleibt die warme Abluft des Kühlkörpers im Gehäuse gefangen.

Da der getestete Aufbau dem von H.E.S.S. nachempfunden wurde, ist davon aus-

zugehen, dass auch dortige CCD-Kameras ihre empfohlenen Betriebstemperatur überschreiten. Zum Einsatz kommen aktuell die Modelle Apogee Alta U2 als Lid- und SingleCCD sowie die Apogee Alta U1 als SkyCCD (Lennarz, 2012). Beide weisen eine maximale Betriebstemperatur von 27 °C auf (Optcorp.com, 2015). Mit der zur Aspen CG8300 ähnlichen Leistung von 40 W, ist eine Überschreitung der empfohlenen Betriebstemperatur anzunehmen.

In dieser Arbeit wurde das Kameragehäuse so weiterentwickelt, dass die Aspen CG8300 stets innerhalb des vorgesehenen Temperaturbereichs arbeitet. Hinzu kommt der Verzicht auf aktive Kühlelemente. Beides soll ein weitestgehend wartungsfreies System garantieren.

## 2.4 Temperaturmessung - Voltcraft PL-125-T4USB VS

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Kamera in verschiedenen Gehäuseaufbauten getestet um jeweils eine Aussage über die maximal zu erwartende Gehäuseinnentemperatur treffen zu können. Die Temperaturen rund um das Gehäuse wurden mit dem digitalen Thermometer PL-125-T4USB VS der Firma Voltcraft und den mitgelieferten Temperaturfühlern gemessen. Zwei der insgesamt vier Temperatursensoren wurden dazu verwendet, die Lufttemperatur innerhalb und außerhalb des Gehäuses zu messen. Die übrigen zwei Fühler wurden meist in der Nähe des Peltier-Elements oder an der Kamera eingesetzt. Dabei wurden die verwendeten Sensoren mit Klebeband an den zu messenden Objekten angebracht. Das Thermometer ermöglicht die gleichzeitige Messung von vier Temperaturen zwischen  $-200$  und  $1372$  °C mit einer jeweiligen Auflösung von 0,1 K und einer Grundgenauigkeit von  $\pm(0,15\% + 1\text{ °C})$ . Es besteht die Möglichkeit, gemessenen Temperaturen samt Zeitstempel auf dem Gerät zu speichern und mit der mitgelieferten Software Voltcraft Voltsoft (Version 1.85) am Computer auszulesen. Die Speicherintervalle lassen sich dabei zwischen einer Sekunde und 59 Minuten frei wählen. Bei der Wahl der Intervalle ist der auf 18000 Einträge begrenzte Speicher zu berücksichtigen. Betrieben wird das digitale Thermometer mit drei Micro-Batterien (AAA) (s. Datenblatt A.3).

### 3 Auswertung

Um für die CCD-Kamera ein passendes Gehäuse zu finden, sodass sich die verwendete Kamera bei CTA einsetzen lässt, wurden verschiedene Entwicklungsschritte durchlaufen. In jedem Gehäuseprototyp wurde die Kamera betrieben und relevante Temperaturen wie die Innentemperatur und die Umgebungstemperatur gemessen. In dieser Arbeit soll eine Auswahl an Messungen den Verlauf und die Ergebnisse der Gehäuseentwicklung darstellen.

Um die Auswirkungen der Sonneneinstrahlung auf die Gehäuseinnentemperatur abschätzen zu können wurden zwei Messungen im direkten Sonnenlicht durchgeführt (s. Abschn. 3.3.7).

Die Auswertung aufgenommener Daten erfolgte mit den Analyse Frameworks *ROOT* (Version 6.04/00).

#### 3.1 CCD- und Heatsinktemperatur

Die verwendete Kamera ermöglicht das Auslesen von CCD- und Heatsinktemperatur. Laut wörtlicher Übersetzung entspricht die Heatsinktemperatur der Temperatur des Kühlkörpers. Betrachtet man diese beiden Werte, fällt auf, dass die Heatsinktemperatur stets geringer ausfällt als die des CCD-Chips. Selbst wenn die Kamera gerade erst eingeschaltet wurde und die CCD-Temperatur noch der Umgebungstemperatur entspricht, weist die Heatsinktemperatur einen um etwa 8 K niedrigeren Wert auf. Diese nicht nachvollziehbare Zusammenhang beider Temperaturen veranlasste eine genauere Untersuchung.

Trägt man beide Temperaturen gegeneinander auf, so ist eine lineare Abhängigkeit zu erkennen (s. Abb. 3.1). Mittels linearer Fitfunktion

$$T_{hs}(T_{ccd}) = a \cdot T_{ccd} + b,$$

mit  $T_{hs}$  der Heatsink- und  $T_{ccd}$  der CCD-Temperatur ergibt sich die Steigung  $a = 0.89294$  und der Offset  $b = -5.3889^\circ\text{C}$ .

Die lineare funktionale Abhängigkeit legt nahe, dass eine der Temperaturen gemessen und aus deren Wert die andere berechnet wird. Da über die Ansteuerung der Kamera eine CCD-Temperatur von  $-10^\circ\text{C}$  vorgegeben wurde und die Kamera diese über einen längeren Zeitraum beibehält, ist zu vermuten, dass es sich bei der gemessenen Temperatur um die CCD-Temperatur handelt. Hinzu kommt, dass die Temperaturen aller Bauteile der Kamera direkt nach dem Einschalten der Umgebungstemperatur entsprechen, dies aber bei der ausgelesenen Heatsinktemperatur nicht der Fall ist. Bestätigt wird diese These dadurch, dass bei der Demontage des Kühlkörpers an diesem kein Temperatursensor angebracht war.

Die Heatsinktemperatur ist somit aus der CCD-Temperatur berechnet und lässt keine Aussage über die tatsächliche Kühlkörpertemperatur zu. Fraglich ist auch,

### CCD-Heatsink-Korrelation

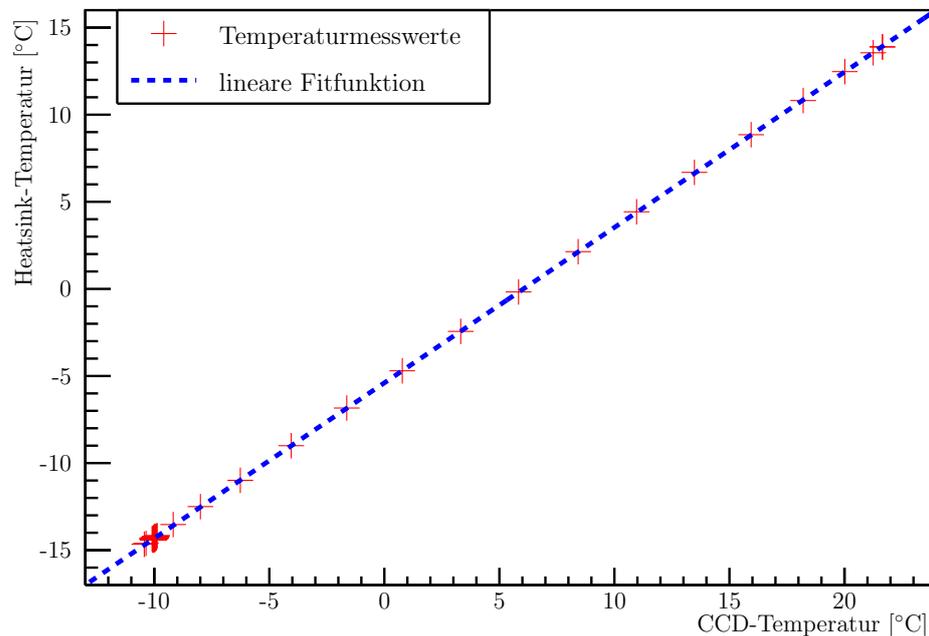


Abbildung 3.1: CCD- und Heatsinktemperatur eines Kühl- und anschließenden Aufheizvorganges des CCD-Chips gegeneinander aufgetragen. Direkte lineare Abhängigkeit weist auf analytische Berechnung der Heatsinktemperatur hin. Längeres Verweilen der Kamera bei  $-10^{\circ}\text{C}$  CCD-Temperatur führt zur Anhäufung an Messpunkten in der linken unteren Ecke.

wieso die Kühlkörpertemperatur geringer als die des CCD-Chips ausfallen sollte, obwohl der Kühlkörper an der warmen Seite des Peltier-Elements angebracht ist. Als Konsequenz dieser Beziehung zwischen CCD- und Heatsinktemperatur wurde in den Studien lediglich die ausgegebene CCD-Temperatur der Kamera berücksichtigt oder die Kühlkörpertemperatur mit einem externen Thermometer gemessen.

## 3.2 Voltcraftungenauigkeiten

Spätere Messungen wiesen eine zeitliche Ungenauigkeit der mit dem Voltcraft gemessenen Temperaturen auf. Sichtbar wurde dies bei Temperaturmessungen, bei denen die Kamera über das Programm *heatupcooldown.cpp* angesteuert wurde. Bei einigen dieser Messungen war auffällig, dass die mit dem Voltcraft gemessenen Temperaturen innerhalb der ersten zehn Stunden wieder sinken. Da die Chip-Temperatur für die ersten zehn Stunden konstant bei  $-10^{\circ}\text{C}$  ist, lässt sich der Fehler beim Messgerät vermuten. Um realitätsnahe Temperaturverläufe zu erhalten,

wurden Messungen mit einer zeitlichen Ungenauigkeit größer als sechs Minuten wiederholt.

### 3.3 Gehäusetemperaturen einzelner Prototypen

#### 3.3.1 Erster Gehäuseprototyp

**Messung der Gehäusetemperaturen** Im ersten Versuchsaufbau wurde die Kamera in ihrem Originalzustand in dem Gehäuse betrieben (s. Abb. 3.2). Mit dem

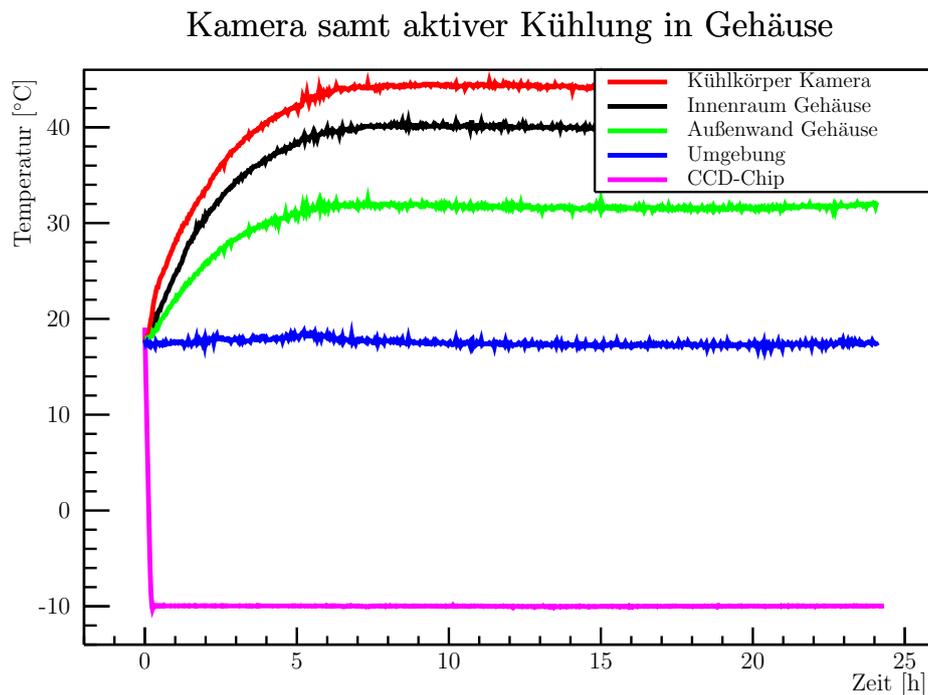


Abbildung 3.2: Aufheizvorgang des Kameragehäuse nach Einschalten der Kamera und Starten von *longtemperature.cpp*. (Erster Prototyp)

digitalen Thermometer wurden die Temperatur des Kühlkörpers der Kamera, die Lufttemperatur im Innenraum des Gehäuses, die Außenwandtemperatur sowie die Umgebungstemperatur gemessen. Zur Messung der Außenwandtemperatur wurde eine Temperatursonde auf die Seitenwand des Gehäuses geklebt. Aus den oben genannten Gründen (s. Abschn. 3.1) wurde zur Messung der Kühlkörpertemperatur ein Fühler zwischen den Stiften des Kühlkörpers angebracht. Die Messdauer betrug etwa 24 Stunden.

Auffällig ist, dass die Luft im Inneren des Gehäuses eine Temperatur von  $40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht, womit die Kamera bei ihrer maximalen Betriebstemperatur arbeitet. Da die

Umgebungstemperatur im Schnitt  $17,5^\circ\text{C}$  beträgt und somit  $7,5\text{ K}$  unter der in den CTA-Spezifikationen angegebenen Maximaltemperatur liegt, ist ein Überschreiten der Kamerabetriebstemperatur abzusehen.

Der Temperaturunterschied zwischen Innen- und Umgebungsluft lässt eine Abschätzung des Wärmewiderstands zu.

**Abschätzung des Wärmetransports** Der Wärmefluss erfolgt maßgeblich über die Gehäuserückwand sowie über die Seitenwand. Die Glasscheibe kann vernachlässigt werden, da Glas mit  $\lambda_{\text{Glas}} = 1,0 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  im Vergleich zu beiden Aluminiumteilen mit  $\lambda_{\text{Al}} = 235 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  einen deutlich größeren Wärmewiderstand aufweist (Halliday et al., 2009). Der Gesamtwärmewiderstand des Gehäuses lässt sich als Parallelschaltung einzelner Wärmewiderstände modellieren (s. Abb. 3.3). Die Wi-

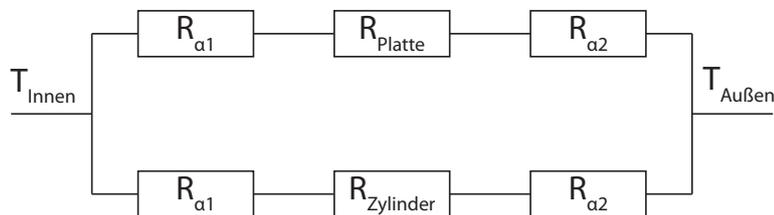


Abbildung 3.3: Schematische Anordnung der einzelnen Wärmewiderstände des Kameragehäuses. Thermischer Widerstand des Übergangs zwischen Innenluft und Gehäuseinnenseite ( $R_{\alpha 1}$ ) sowie Gehäuseaußenseite und Umgebungsluft ( $R_{\alpha 2}$ ) in Kombination mit den Wärmeleitwiderständen der Rückplatte ( $R_{\text{Platte}}$ ) und des Hohlzylinders ( $R_{\text{Zylinder}}$ ).

derstände von Rückplatte  $R_{\text{Platte}}$  und Hohlzylinder  $R_{\text{Zylinder}}$  lassen sich mithilfe der Wärmestromdichte  $\vec{j}_Q = \frac{\dot{Q}}{A}$  berechnen. Für die Seitenwand erhält man

$$\frac{\dot{Q}_Z}{A_Z} = -\lambda_{Al} \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{mit } A_Z = 2\pi r h$$

$$\frac{\dot{Q}_Z}{2\pi h} \cdot \int_{r_i}^{r_a} \frac{1}{r} dr = -\lambda_{Al} \cdot \int_{T_i}^{T_a} dT$$

$$\frac{\dot{Q}_Z}{2\pi h} \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) = \lambda_{Al} \Delta T \quad \text{mit } \Delta T = T_i - T_a$$

$$\dot{Q}_Z = \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \cdot \lambda_{Al} \Delta T.$$

- $\dot{Q}_Z$ : Wärmestrom durch Hohlzylinder  
 $A_Z$ : Mantelfläche des Hohlzylinders  
 $h$ : Höhe des Hohlzylinders  
 $r_i$ : Innenradius  
 $r_a$ : Außenradius  
 $\lambda_{Al}$ : Wärmeleitfähigkeit Aluminium  
 $T_i$ : Temperatur der Gehäuseinnenwand  
 $T_a$ : Temperatur der Gehäuseaußenwand

Umgestellt liefert diese Gleichung den thermischen Widerstand der Gehäuseseitenwand

$$R_{Zylinder} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_Z} = \frac{1}{\lambda_{Al}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2\pi h}.$$

Mit der Höhe  $h = 270$  mm, dem Innenradius  $r_i = 120$  mm, dem Außenradius  $r_a = 125$  mm und der Wärmeleitfähigkeit von Aluminium  $\lambda_{Al} = 235 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  ergibt sich für den Zylinder ein Wärmewiderstand von  $R_{Zylinder} = 1,02 \times 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$ .

Analog lässt sich auch Gleichung (2) für die Rückplatte umformen. Mit einer Fläche von  $A = 0,045 \text{ m}^2$  und einer Materialstärke  $L = 15$  mm ergibt sich der Widerstand  $R_{Platte} = 0,014 \frac{\text{K}}{\text{W}}$ .

Ohne Berücksichtigung des Wärmeübergangs an den Grenzflächen würde die gemessene Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft einen Wärmestrom von  $\dot{Q} = 15,7$  MW hervorrufen. Sowohl die Größenordnung, als auch die 50 W Maximalleistung der Kamera zeigen die Grenzen dieser einfachen Abschätzung. Was die Überschlagsrechnung gut verdeutlicht, ist die Relevanz der Übergangskoeffizienten  $\alpha$ . Wie bereits in der Einleitung erwähnt, gestaltet sich die Berechnung dieser Koeffizienten schwierig. Anhand der gemessenen Temperaturen und einiger Annahmen sollen die Wärmeübergangskoeffizienten an dieser Stelle grob abgeschätzt werden. Als Wärmestrom werden 40 W, 80 % der maximalen Betriebsleistung der Kamera

angenommen. Zusätzlich wird von einer gleichmäßigen Innenwand- wie Außenwandtemperatur ausgegangen. Die Widerstände  $R_{\alpha_1}$  und  $R_{\alpha_2}$  des Wärmeübergangs lassen sich somit zusammenfassen. Aus der erweiterten Parallelschaltung (s. Abb. 3.3) wird eine erweiterte Reihenschaltung. Mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T_{\text{außen}}$  zwischen Gehäuseaußenwand und Umgebung, sowie dem angenommenen Wärmestrom, lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_2$  zwischen Gehäuse und Umgebung berechnen. Man erhält

$$\dot{Q} = \alpha_2 \cdot A_{\text{außen}} \cdot \Delta T_{\text{außen}} \quad \implies \quad \alpha_2 = 10,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

mit  $A_{\text{außen}}$  der Außenfläche des Gehäuses. Über die erweiterte Reihenschaltung lässt sich der verbleibende Übergangskoeffizient zu

$$\alpha_1 = 20,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

berechnen. Beide Ergebnisse sind mit den empfohlenen Werten verträglich (s. Abschn. 1.5). Die Lüfter der Kamera erzeugen im Inneren des Gehäuses eine turbulente Strömung. Aufgrund dieser fällt  $\alpha_1$  größer als  $\alpha_2$  aus.

Eine genauere Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit einzelner Gehäuseelemente war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Durch eine Weiterentwicklung des Gehäuses wurde versucht, die Überschreitung der Betriebstemperatur zu verhindern. Diese Entwicklung soll in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden.

Aus Gründen der besseren Darstellbarkeit wird in den kommenden Plots die CCD-Temperatur ausgespart. Anzumerken ist lediglich, dass der CCD-Chip die vorgegebene Temperatur von  $-10^\circ\text{C}$  innerhalb von zwanzig Minuten erreicht und konstant beibehält.

### 3.3.2 Konfiguration A - Kupferrohre

Als erster Entwicklungsschritt wurde der Kühlkörper samt Lüfter von der Kamera entfernt (s. Abb. 3.4). Um die Abwärme des Peltier-Elements an die Umgebung abzuführen, wurde die Kühleinheit durch zwei ineinander gesetzte Kupferrohre ersetzt (s. Plan B.1). Beide Rohre sind jeweils auf einer Seite mit einer Kupferplatte verschraubt, um den thermischen Kontakt zur planen Fläche der Kamera und des Gehäuses zu erhöhen. Das Material Kupfer wurde aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{Cu} = 401 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  gewählt (Halliday et al., 2009). Das Rohr aufseiten der Kamera wird in das Rohr auf der Gehäuserückwand eingesetzt. Diese Steckverbindung soll verhindern, dass beim Verschrauben der Kamera mit der Rückplatte zu viel Druck auf das Peltier-Element und den dahinter befindlichen Chip ausgeübt wird. Um den thermischen Kontakt zu verbessern, wurde auf sämtliche

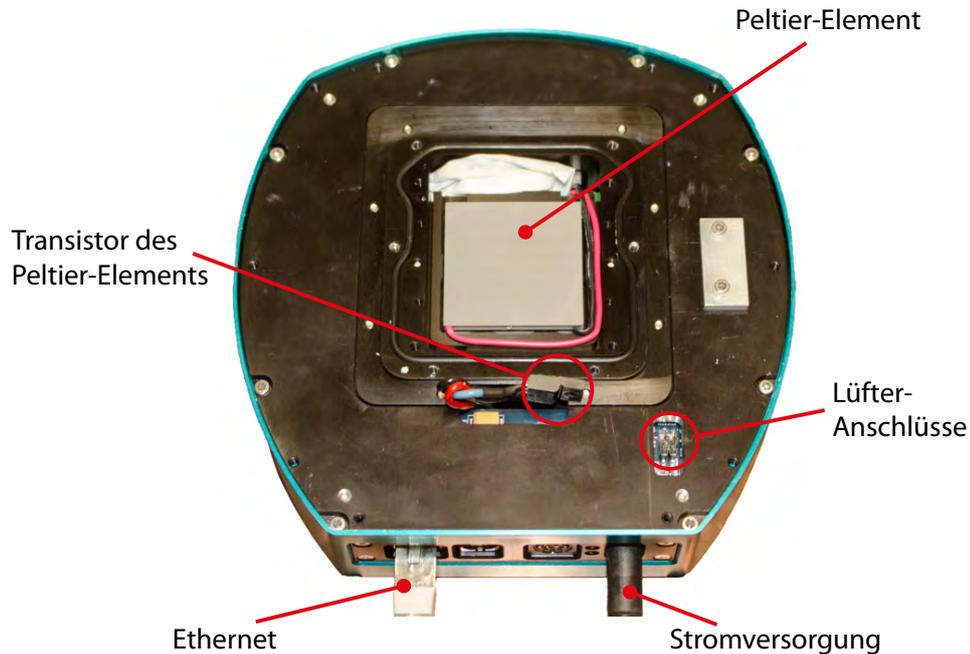


Abbildung 3.4: Kamerarückseite nach Entfernung von Lüftern und Stiftkühlkörper.

Kontaktflächen Wärmeleitpaste aufgebracht. Diese Paste soll kleinste Hohlräume auffüllen und dadurch die Kontaktfläche vergrößern und den Wärmeübergang erhöhen.

Dieser Aufbau wurde mit dem Programm *longtemperature.cpp* getestet und dabei verschiedene Temperaturen gemessen (s. Abb. 3.5). Zwei Temperaturfühler wurden im Inneren des Gehäuses angebracht. Damit wurde die Temperatur der Kupferplatte auf dem Peltier-Element sowie die Temperatur der Luft gemessen. Mit den übrigen Fühlern wurde die Temperatur der Umgebungsluft und der Gehäuserückplatte bestimmt.

Auffällig ist der kurzzeitige Anstieg der Umgebungstemperatur bei etwa dreißig Stunden. Diese Erhöhung wurde um ca. 16 Uhr gemessen und ist auf die Position der Sonne zurückzuführen. Die Gehäusetemperaturen wurden in einem Labor mit Südostausrichtung gemessen. An sonnigen Tagen heizten sich so, vor allem am Nachmittag, die heruntergelassenen Rollos auf, wodurch die Raumtemperatur schnell anstieg. Bemerkenswert ist, wie sich der Anstieg der Umgebungsluft auf die anderen Messpunkte auswirkt. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass zunächst die Temperaturen der Gehäuserückwand und der Kupferteile auf den Anstieg reagieren, bevor sich die Luft im Inneren des Gehäuses erwärmt. Erklären lässt sich die verzögerte Reaktion der Innentemperatur über die jeweiligen thermischen Widerstände zwischen Messpunkt und Umgebungstemperatur. Zu berücksichtigen

## Kupferrohr als Wärmeleitung

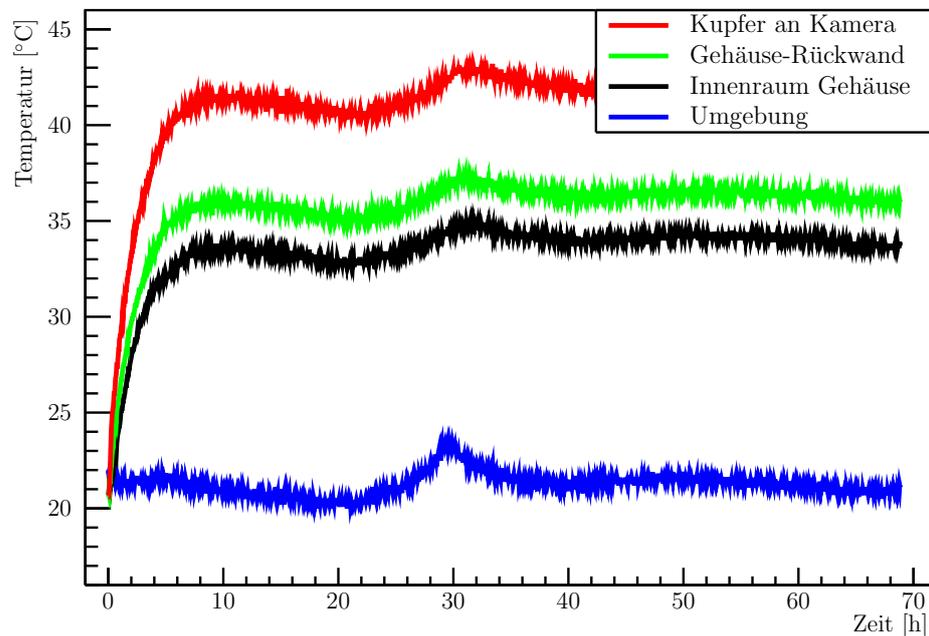


Abbildung 3.5: Aufheizvorgang des Kameragehäuses nach Einschalten der Kamera und Starten von *longtemperature.cpp*. Kupferrohrverbindung als Wärmekopplung zwischen Kamera und Gehäuse. Peak der Umgebungstemperatur bei dreißig Stunden durch Sonneneinstrahlung verursacht (s. Abschn. 3.3.2) (Konfiguration A)

ist, dass die Luft-Metall-Übergänge für den thermische Widerstand des gesamten Aufbaus ausschlaggebend sind (s. Abschn. 3.3.1). Da es, im Gegensatz zur Kupferplatte an der Kamera, zwischen Innen- und Außenluft zwei Luft-Metall-Übergänge gibt, ist demnach auch der Wärmewiderstand größer. Die Innenluft ist also besser gegenüber der Umgebung isoliert als der Kupferaufbau im Inneren des Gehäuses. Die Lufttemperatur reagiert somit später auf äußere Temperaturänderungen als Gehäusekomponenten.

Zuletzt bleibt noch zu erwähnen, dass die Temperaturpeaks der Kupferplatte an der Kamera, der Gehäuseaußenwand sowie der Innentemperatur aufgrund der thermischen Kapazität der Komponenten geringer ausfallen. Die spezifische Wärmekapazität des Gehäuses, sowie dessen Verhalten bei Temperaturänderungen soll nicht Thema dieser Arbeit sein.

Zwischen Innenraum und Umgebung stellte sich eine mittlere Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 12,5 \text{ K}$  bei  $21,3 \text{ °C}$  Umgebungstemperatur ein. Für die geforderten  $25 \text{ °C}$  Betriebstemperatur würde sich so eine Innentemperatur von  $37,5 \text{ °C}$  ergeben. Nicht berücksichtigt ist dabei die Tatsache, dass ein Anstieg der Innentemperatur mehr

Kühlleistung des Peltier-Elements erfordert. So steigt die elektrische Leistung der Kamera und damit auch der Wärmestrom. Bei gleichbleibendem Gehäuse bedeutet dies einen zusätzlichen Anstieg der Innentemperatur.

Ein weiterer Versuch, die Temperaturdifferenz zu minimieren, war die Isolierung der Kupferverbindung zwischen Peltier-Element und Gehäuserückwand. Die Idee dahinter war, die Abwärme des Peltier-Elements ausschließlich über die Rückwand und möglichst nicht über die Kupferteile an die Innenluft abzugeben. Zur Isolierung wurde ein passendes Styroporrohr mit ca. drei Zentimeter Wandstärke zurecht geschnitten und um die Kupferteile herum angebracht. Gegen die Erwartung stieg die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Umgebungsluft auf  $\Delta T = 16,3\text{ K}$  an. Eine mögliche Erklärung ist die höhere Temperatur aufseiten des Peltier-Elements, die durch die Isolierung entsteht. So wird aufgrund des Styropors weniger Wärme direkt an die Innenluft abgegeben, weshalb sich das Kupfer weiter aufheizt. Damit steigt die benötigte Kühlleistung und somit auch der Wärmestrom und die Temperatur im Gehäuseinneren.

### 3.3.3 Konfiguration B - Gekürzte Kupferrohre

Als nächster Entwicklungsschritt wurde der Abstand zwischen Gehäuserückwand und Peltier-Element verkürzt. Hierzu wurden beide Kupferrohre von 92 mm und 94 mm auf 20 mm und 22 mm gekürzt. Das Ziel dieser Maßnahme war, den thermischen Widerstand gemäß Gleichung (2) durch einen kürzeren Aufbau zu verkleinern. Zur Verdeutlichung der Ansteuerung mittels *heatupcooldown.cpp* ist in Abbildung 3.6 die CCD-Temperatur mit eingezeichnet. Nach zehn Stunden Betriebszeit beendet die Kamera die Chipkühlung und die Aufnahme von Darkframes. Die fehlende Kühlung führt zu einer Erwärmung des CCD-Chips. Das Plateau der CCD-Temperatur in der elften Stunde weist eine konstante Temperatur von  $39,6552\text{ °C}$  auf. Aufgrund des zu erwartenden Anstiegs und der fehlenden Fluktuation scheint es sich um einen Messfehler zu handeln. Ein ähnliches Plateau bei  $39,6552\text{ °C}$  wurde auch bei anderen Messungen beobachtet.

Mit dem Voltcraft wurde bei dieser Messung neben der Umgebungs-, der Innenraum- und der Kupfertemperatur auch die Temperatur der Kamera gemessen. Dazu wurde ein Temperatursensor auf der türkisfarbenen Metallverkleidung nahe des Objektivs angebracht. Der anfängliche Temperaturunterschied der Umgebungstemperatur zu den anderen gemessenen Temperaturen rührt daher, dass die Kamera vor Beginn der Messung im Stand-by-Betrieb lief. Folgende Messungen wurden weitestgehend aus dem Stand-by-Betrieb gestartet. Dies soll eine Aussage über den Kamerabetrieb außerhalb der nächtlichen Messphase ermöglichen. Wie die Abbildung 3.6 zeigt, fällt die Temperatur der Kamera mit  $46,7\text{ °C}$  um  $3,9\text{ K}$  größer aus, als die der Kupferplatte am Peltier-Element. Dies zeigt, dass neben dem Peltier-Element auch die Kameraelektronik maßgeblich zur Aufheizung des Innenraums beiträgt. Eine

## Gekürztes Kupferrohr

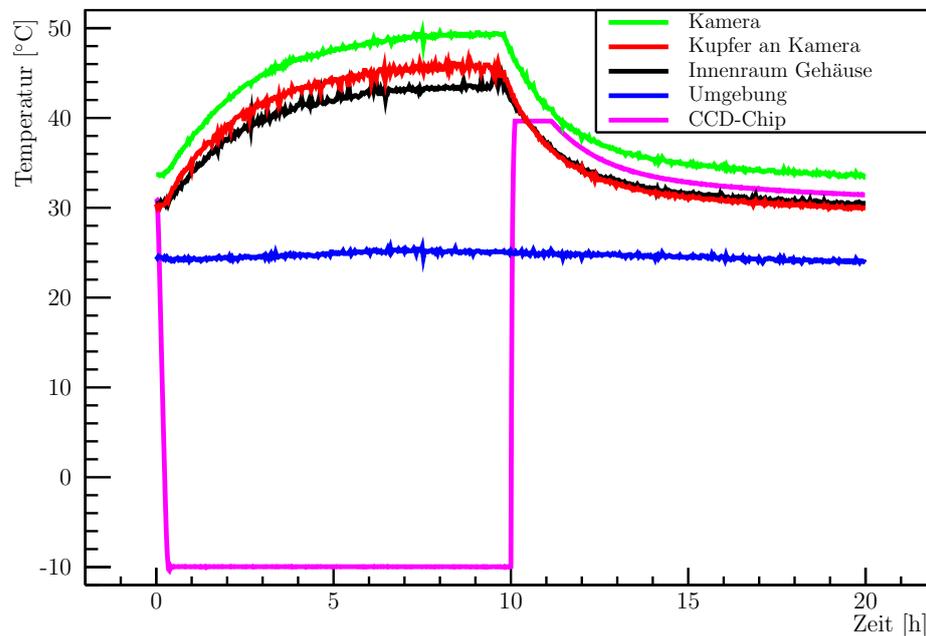


Abbildung 3.6: Aufheiz- und Abkühlvorgang des Kameragehäuses mit Programm *heatupcooldown.cpp*. Kamera bereits vor Programmstart eingeschaltet. Gekürzte Kupferrohrverbindung als Wärmekopplung zwischen Kamera und Gehäuse. Plateau der CCD-Temperatur in der elften Stunde bei  $39,6552\text{ °C}$  (s. Abschn. 3.3.3). (Konfiguration B)

Möglichkeit die Abwärme der Kamera abzuführen soll in Abschnitt 3.3.6 aufgezeigt werden.

Die Temperaturdifferenz zwischen der Luft innerhalb und außerhalb des Gehäuses beträgt etwa  $19,2\text{ K}$ . Im Vergleich zu Konfiguration A ist das Gehäuseinnere um  $10,1\text{ K}$  wärmer. Trotz der um  $3,6\text{ K}$  höheren Umgebungstemperatur von durchschnittlich  $24,9\text{ °C}$  weist die Kupferplatte an der Kamerarückseite nur einen Temperaturanstieg von  $2,0\text{ K}$  auf. Die Wärmeleitung zwischen Peltier-Element und Gehäuse hat sich somit verbessert. Ein möglicher Grund für die höhere Temperaturdifferenz von Konfiguration B im Vergleich zu Konfiguration A könnte in der Kameraaufhängung liegen. Während die Kamera in Konfiguration A über eine Montageplatte mit der Rückplatte verschraubt war, lag die Kamera in Konfiguration B lediglich über die Kupferkonstruktion auf der Rückplatte auf. Hinter dieser Montageplatte könnte es zum Stau der warmen Luft gekommen sein, weshalb die gemessene Temperatur zwischen Kamera und Glasscheibe geringer ausfiel. Hinzu kommt, dass die Montageplatte einen Bruchteil der Kamerawärme über die vier

Montagebolzen an die Rückplatte und somit an die Umgebung abgibt. Hinzu kommt, dass die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft bei steigender Umgebungstemperatur nicht konstant bleibt. Dies könnte einen weiteren Bruchteil der gesteigerten Temperaturdifferenz zwischen Gehäusesinnenraum und Umgebung erklären.

Genauer konnte dieser Effekt nicht untersucht werden, da es nach dem Kürzen der Kupferrohre nicht mehr möglich war Konfiguration A herzustellen und weitere Messungen durchzuführen.

### 3.3.4 Konfiguration C - Kühlkörper

Um die Innentemperatur der Umgebungstemperatur weiter anzupassen, gilt es den thermischen Widerstand des Gehäuses weiter zu minimieren. Wie in Abschnitt 1.5 erwähnt und am Beispiel des ersten Prototypen gezeigt (s. Abschn. 3.3.1) bedeutet dies in erster Linie eine Minimierung des thermischen Widerstands an den Grenzübergängen. Dies geschieht sowohl durch eine vergrößerte Grenzfläche  $A$ , als auch durch einen höheren Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$ . Beides wird durch einen geeigneten Kühlkörper erreicht. Für diesen Aufbau wurde ein 250 mm langer, passiver, schwarz eloxierter SK 49 Kühlkörper der Firma Fischer Elektronik verwendet (s. Abb. 3.7). Im Gegensatz zu aktiven benötigen passive Kühlkörper keine forcierte Luftkühlung und somit keine zusätzlichen Lüfter. Durch einen besonderen Aufbau regen passive Kühlkörper die Konvektion selbständig an, um so die Kühlleistung zu erhöhen. Aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus und einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit fallen passive Kühlkörper bei gleicher Kühlleistung größer als aktive Kühlkörper aus.

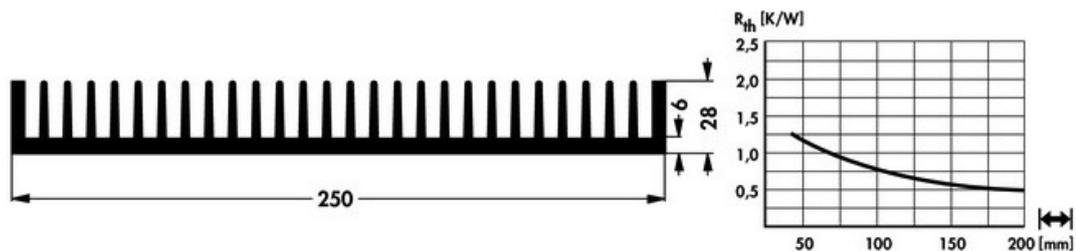


Abbildung 3.7: Querschnitt des verwendeten Kühlkörpers SK 49 samt thermischem Widerstand in Abhängigkeit der Länge (Fischerelektronik.de, 2015).

Die unbekannte Aufteilung des Wärmestroms über Zylinder- und Rückwand lässt keine präzise Aussage über die zu erwartende Gehäuseinnentemperatur zu. Nimmt man den zuvor berechneten Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_2 = 10,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$  (s. Abschn. 3.3.1) für den Übergang zwischen äußerer Gehäuserückwand und Umgebung

an, so lässt sich mit der Fläche  $A = 0,045 \text{ m}^2$  der Widerstand  $R_{P\alpha_2}$  des thermischen Übergangs berechnen. Man erhält

$$R_{P\alpha_2} = \frac{1}{\alpha_2 \cdot A} = \frac{1}{10,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 0,045 \text{ m}^2} = 2,07 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Laut Herstellerangaben weist ein SK 49 Kühlkörper mit einer Länge von 250 mm einen Widerstand von  $R_{th} \leq 0,5 \frac{\text{K}}{\text{W}}$  auf. Der Kühlkörper gibt die Wärme also viermal besser an die Umgebung ab, als die glatte Rückplatte. Die Auswirkung auf die Innentemperatur wird in Abbildung 3.8 verdeutlicht. Die Kamera, die

### Kühlkörper an Gehäuserückseite

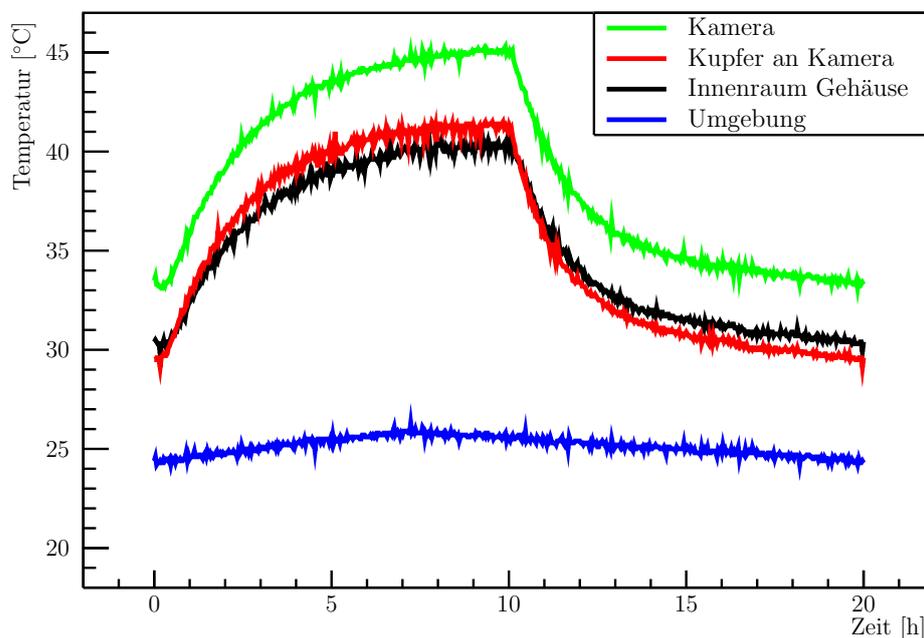


Abbildung 3.8: Aufheiz- und Abkühlvorgang des Kameragehäuses mit Kühlkörper auf Gehäuserückplatte. Gehäuse nach oben hin ausgerichtet, um Konvektion am Kühlkörper zu minimieren. (Konfiguration C)

Kupferplatte an der Kamera sowie der Innenraum des Gehäuses haben nach zehn Stunden Betriebszeit ihre Maximaltemperatur noch nicht erreicht. Aus diesem Grund wurden in die Anstiegskurven der Temperaturen  $e$ -Funktionen gefittet. Als Maximaltemperaturen erhält man so für die Kamera  $45,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , für das Kupfer am Peltier-Element  $41,5 \text{ }^\circ\text{C}$  und für die Gehäuseinnenraumtemperatur  $40,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Als mittlere Umgebungstemperatur wurden  $25,2 \text{ }^\circ\text{C}$  gemessen. Die geforderte Umgebungstemperatur von  $25,0 \text{ }^\circ\text{C}$  wurde somit um  $0,2 \text{ K}$  überschritten, die empfohlene Betriebstemperatur der Kamera um  $0,7 \text{ K}$ .

### 3.3.5 Konfiguration D - Kühlrippen

Um die Wärmeleitung des Gehäuses weiter zu verringern, wurden an der Außenfläche des Hohlzylinders 16 Aluminiumkühlrippen, auch Kühlbleche genannt, angebracht (s. Abb. 3.10). Diese sollen analog zum Kühlkörper auf der Gehäuserückseite den Wärmeübergang zwischen Gehäusemantelfläche und Umgebungsluft verbessern. Eine Kühlrippe besteht aus einem 2,0 mm dickem Aluminiumblech, ist etwa 250 mm lang und 40 mm hoch. Durch die Trapez ähnliche Form ergibt sich pro Kühlblech eine Oberfläche von ca. 200 cm<sup>2</sup>. 16 dieser Kühlrippen erweitern die Oberfläche des Hohlzylinders so von 2570 cm<sup>2</sup> auf 5770 cm<sup>2</sup>.

Eine einfache Abschätzung des Wärmewiderstands mit Kühlrippen ist nicht möglich, da jede Kühlrippe einen internen Temperaturgradienten aufweist. Mit steigendem Abstand zur Mantelfläche, sinkt so die Temperatur innerhalb der Kühlrippe. Die Messung rund um das Gehäuse ergab folgende Werte (s. Abb. 3.9). Die Metall-

Kühlkörper und Kühlrippen

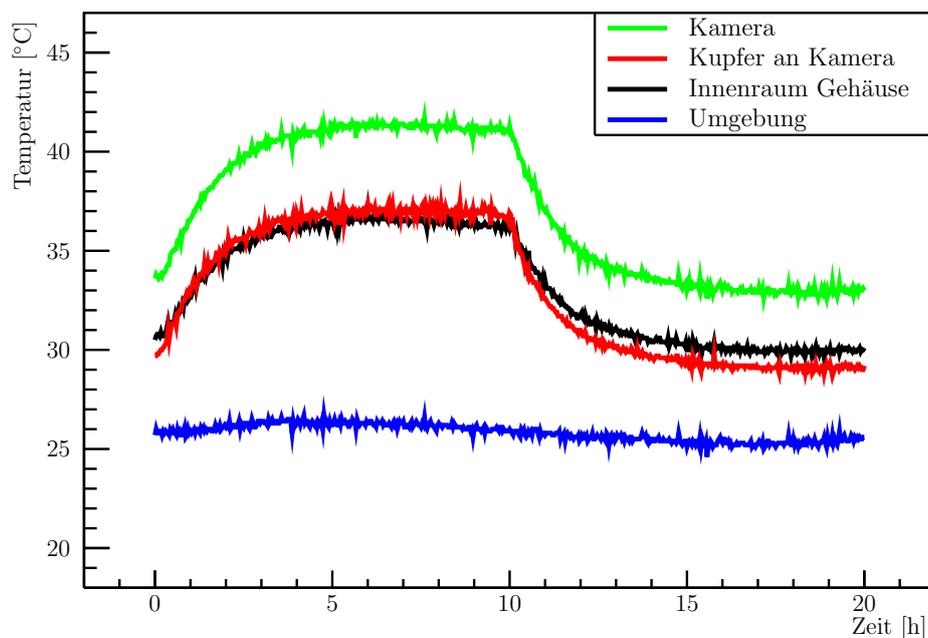


Abbildung 3.9: Aufheiz- und Abkühlvorgang des Kameragehäuses mit Kühlkörper auf Gehäuserückplatte und Kühlrippen an der Zylinderäußenwand. Gehäuse nach oben hin ausgerichtet. (Konfiguration D)

oberfläche der Kamera erreichte eine Temperatur von 41,4 °C, die Kupferplatte am Peltier-Element eine Temperatur von 37,0 °C. Die Lufttemperatur im Innenraum des Gehäuses wies bei einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur von

25,8 °C eine Temperatur von 36,6 °C auf. Damit wurde neben dem Aufbau aus Abschnitt 3.3.2 eine weitere Konfiguration gefunden, in der die Innentemperatur die maximale Betriebstemperatur der Kamera, von 40 °C, nicht überschreitet. Im Gegensatz zum Aufbau mit der ursprünglichen Kupferverbindung zwischen Kamera und Gehäuserückwand, wurde die Konfiguration D bei einer Temperatur oberhalb der von CTA geforderten Betriebstemperatur von 25 °C, gemessen.

Auffällig ist die im Vergleich zur Innentemperatur deutlich erhöhte Kameratemperatur. Da sich die Angaben von Apogee bezüglich der zulässigen Betriebstemperatur auf die Umgebungsluft beziehen, lässt sich keine Aussage über maximale Kameratemperatur machen. Um die maximal zulässige Kamertemperatur zu ermitteln, wurde die Aspen CG8300 in ihren Originalzustand zurückgebaut und in einer Klimakammer bei 40 °C getestet.

Die Klimakammer ist allerdings nicht groß genug, um darin das gesamte Kameragehäuse unterzubringen. Deshalb wurden vorherige Messungen im Labor bei wechselnden Lufttemperaturen durchgeführt.

Der Kameratest bei 40 °C zeigte, dass sich die türkisfarbenen Metallverkleidung der Kamera, nahe des Objektivs, auf 42,5 °C aufheizt. Fraglich bleibt, warum die Verkleidung innerhalb des Gehäuses eine ähnliche Temperatur bei geringerer Lufttemperatur erreicht. Möglicherweise hängt das mit der aktiven Kühlung zusammen, die neben dem Peltier-Element einen weiteren Teil der Kamera belüftet.

### 3.3.6 Konfiguration E - Montagesscheibe

Um die vergleichsweise hohe Kameratemperatur innerhalb des Gehäuses zu senken, wurde die Montageplatte, an der die Kamera angeschraubt war, durch eine Kupferscheibe ersetzt (s. Abb. 3.10). Diese Kupferscheibe, im folgenden auch Montagesscheibe genannt, sollte die Abwärme der Kameraelektronik an die innere Mantelfläche der Gehäusewand weiterleiten. Um eine möglichst große Kontaktfläche zwischen Kamera und Montagesscheibe zu gewährleisten wurde die Kupferscheibe so gefertigt, dass sich die Kamera darin einsetzen lässt. Um die Kontaktfläche weiter zu erhöhen waren zusätzliche Kontaktbacken, ebenfalls aus Kupfer, angedacht. Diese sollten sowohl an die Kamera als auch an das Gehäuse angedrückt werden. Bis zur Beendigung dieser Arbeit wurden diese Kontaktbacken nicht fertiggestellt. Der Aufbau entsprach daher der Abbildung 3.10 ohne Kontaktbacken. Ebenfalls wurde der Kühlkörper nicht auf die Rückplatte zugeschnitten sondern seine Maße von 250x250 mm beibehalten.

Abbildung 3.11 zeigt die Temperatur des Kameragehäuses mit Montageplatte. Direkt auffallend ist, dass im Gegensatz zu vorherigen Messungen, die Kameratemperatur nicht mehr die höchste Temperatur darstellt. Bei einer mittleren Umgebungstemperatur von 22,2 °C erreichte die Kamera eine Temperatur von 31,8 °C. Damit hat sich die Kameratemperatur, abzüglich des Temperaturunterschieds der

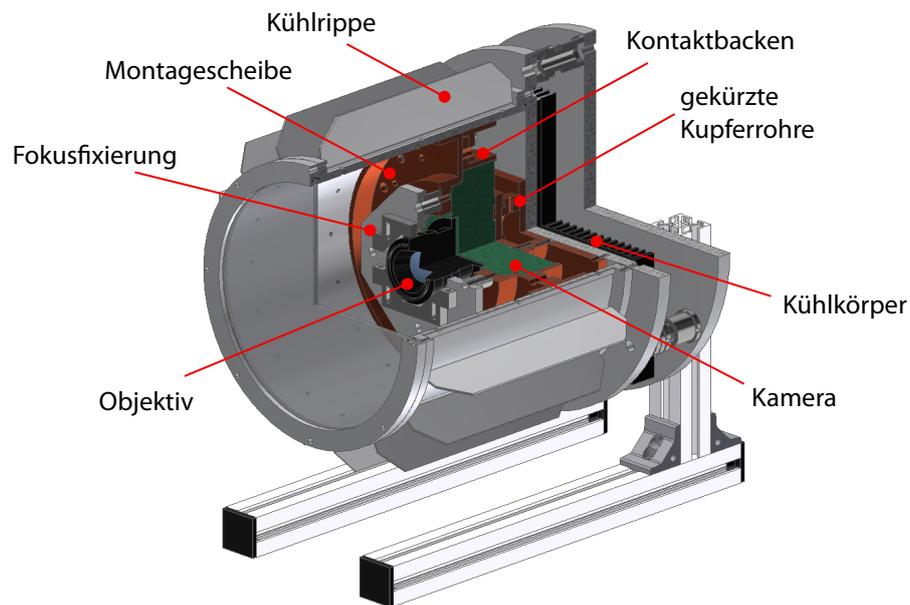


Abbildung 3.10: Viertelschnitt entspricht näherungsweise der zuletzt gemessenen Gehäusekonfiguration E. Kupferteile im Inneren leiten die Wärme der Kamera und des Peltier-Elements an die Außenwand. Kühlkörper und Kühlrippen verringern den Wärmewiderstand zur Umgebungsluft.

Umgebung, von Konfiguration D zu Konfiguration E, um 6,0 K verringert. Die Kupferpatte am Peltier-Element erwärmt sich auf 35,6 °C, der Innenraum auf 29,6 °C. Vergleicht man die Innenraumtemperatur des Aufbaus mit und ohne Montageplatte, wieder unter Berücksichtigung der verschiedenen Umgebungstemperaturen, so fällt die Innenraumtemperatur der Konfiguration E um 3,4 K geringer aus, als bei der vorherigen Konfiguration.

Bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C ist eine Innentemperatur von etwa 32,4 °C zu erwarten, womit auch diese Konfiguration für den Einsatz bei CTA tauglich wäre.

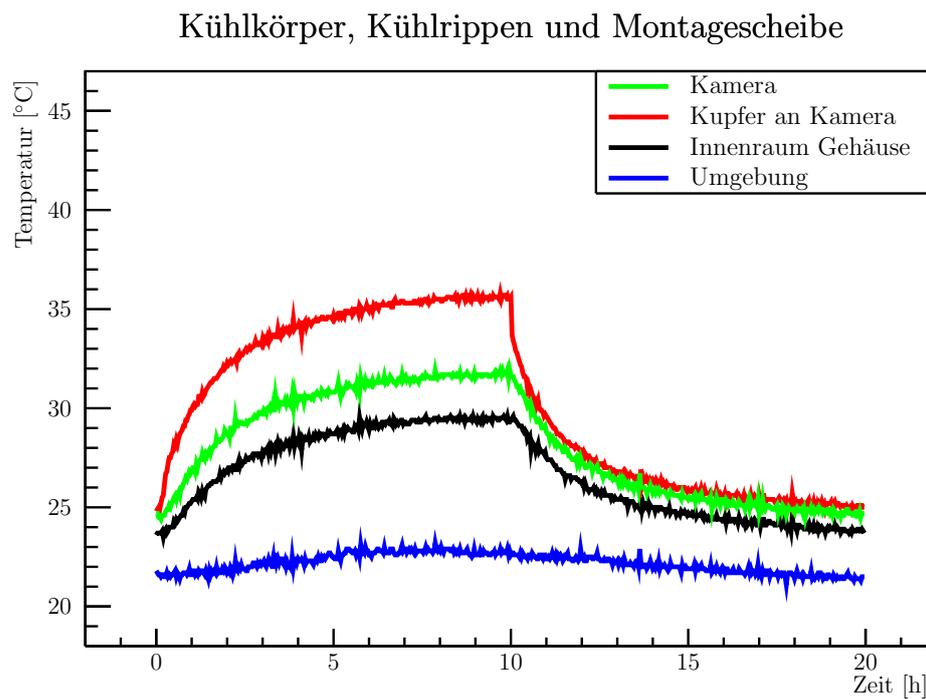


Abbildung 3.11: Aufheiz- und Abkühlvorgang des Kameragehäuses mit Kühlkörper auf Gehäuserückplatte, Kühlrippen an der Außenwand des Hohlzylinders und Montageplatte auf der Kamera. Gehäuse nach oben hin ausgerichtet. Innentemperatur zwischen Montage- und Glasscheibe gemessen. (Konfiguration E)

### 3.3.7 Sonneneinstrahlung

Neben der Kamera kann auch die Sonneneinstrahlung zu einer Erwärmung des Gehäuses führen. Um die Gehäusetemperatur bei Sonneneinstrahlung zu bestimmen, wurden zwei verschiedene Messungen im Sonnenlicht durchgeführt. Ziel der Messungen war es, eine maximale Gehäuseinnentemperatur angeben zu können, der die Kamera im ungünstigsten Fall ausgesetzt sein würde. Neben einem wolkenlosen Himmel wurde darauf geachtet, die Messungen an weitestgehend windstillen Tagen durchzuführen. Ohne Wind wird das Gehäuse weniger gekühlt, womit die Innentemperatur weiter ansteigt. Aus Sicherheitsgründen wurde die Kamera vor Beginn der Messung aus dem Gehäuse ausgebaut.

Zum Zeitpunkt der ersten Messung (am 18. März 2015) befand sich das Gehäuse im Zustand des ersten Prototypen (s. Abb. 3.12).



Abbildung 3.12: Auf die Sonne ausgerichtetes Kameragehäuse samt digitalem Thermometer.

In der Messung wurde das Gehäuse alle halbe Stunde auf die Sonne ausgerichtet. Der Hintergedanke dabei war, über die Glasscheibe einen Treibhauseffekt zu erhalten und somit eine möglichst hohe Temperatur im Inneren zu erreichen. Die aufgenommenen Temperaturen sind in Abbildung 3.13 dargestellt. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen der Lufttemperatur innerhalb und außerhalb des Gehäuses (*Differenz innen-außen*) betrug 17,4 K.

Die zweite Messung zur Auswirkung der Sonneneinstrahlung auf die Gehäuseinnentemperatur wurde mit Kühlrippen auf der Gehäuseaußenwand durchgeführt. Im Gegensatz zur ersten Messung wurde das Gehäuse diesmal waagrecht nach Westen ausgerichtet. Mittags schien die Sonne so direkt auf die Mantelfläche samt

## Frontale Sonneneinstrahlung

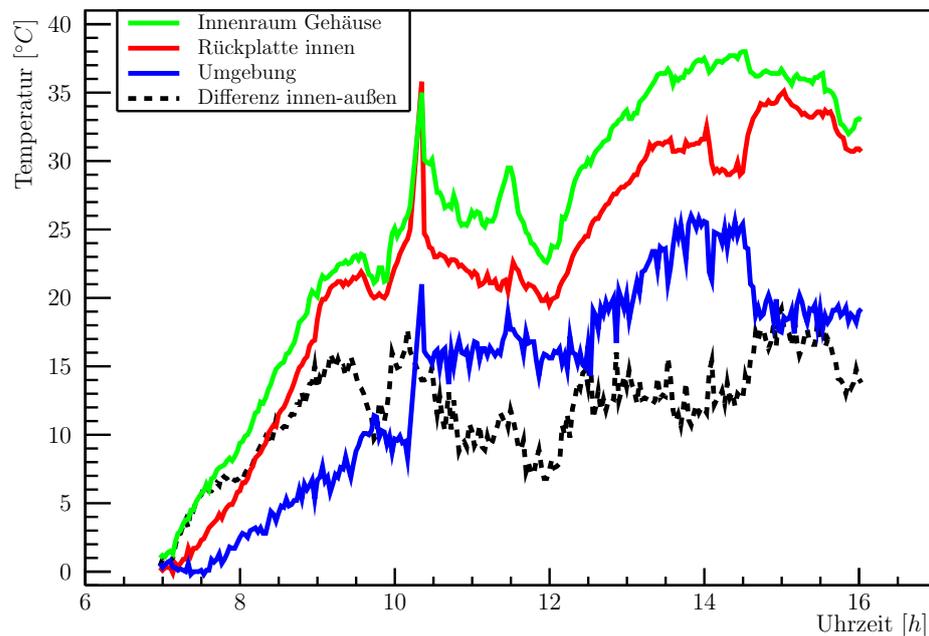


Abbildung 3.13: Durch Sonneneinstrahlung verursachter Temperaturverlauf an verschiedenen Messpunkten. Kameragehäuse nach jeweils dreißig Minuten neu auf Sonne ausgerichtet.

Kühlblechen. Im Gegensatz zur Glasscheibe wurde dadurch eine größere Fläche von der Sonne bestrahlt. Als Gehäuseinnentemperatur stellten sich  $39,2^{\circ}\text{C}$  ein. Die mittlere Umgebungstemperatur betrug  $32,4^{\circ}\text{C}$ . Die Differenz beider Temperaturen entspricht somit  $6,8\text{ K}$ . Dieses Ergebnis ist nicht mit dem aus der ersten Messung zu vergleichen, da die Kühlrippen die Kühlleistung erhöhen und somit auch die zuerst gemessene Temperaturdifferenz von  $17,4\text{ K}$  geringer ausfallen würde.

Die hier angegebenen Temperaturen dienen lediglich der groben Orientierung, da die äußeren Parameter wie Sonneneinstrahlung und Luftdruck nicht denen eines möglichen Standortes von CTA entsprechen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Verlauf der Entwicklung wurden drei mögliche Gehäusekonfigurationen für die Apogee Aspen CG8300 gefunden. Zu diesen zählen: Konfiguration A mit der ungekürzten Kupferrohrverbindung, Konfiguration D mit Kühlkörper und Kühlrippen sowie Konfiguration E mit der Montagescheibe aus Kupfer (s. Tab. 1). Alle drei Gehäusetypen sind jeweils wetterfest und gewährleisten einen Kamerabetrieb innerhalb der empfohlenen Betriebstemperatur. Betrachtet man neben der Lufttemperatur auch die Kameratemperatur, so beschränken sich die möglichen Aufbauten auf Gehäusekonfiguration E.

Aufbau	Umgebung [°C]	Innen [°C]	$\Delta T$ [K]
Erster Prototyp	17,5	40,0	22,5
A Kupferrohrverbindung	21,3	33,8	12,5
B Kupferrohrverbindung kurz	24,7	43,9	19,2
C Kühlkörper	25,2	40,7	15,5
D Kühlrippen	25,8	36,6	10,8
E Montagescheibe	22,2	29,6	7,4

Tabelle 1: Vergleich der getesteten Gehäusekonfigurationen. Umgebungs- und Gehäuseinnentemperaturen sowie die sich daraus ergebenden Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  der getesteten Gehäusekonfigurationen.

Zu berücksichtigen bleibt, dass die Instrumente von CTA mit einer voraussichtlichen Höhe zwischen 1500 und 3800 m über dem Meeresspiegel einem geringeren Luftdruck und einer höheren Sonneneinstrahlung als in Erlangen ausgesetzt sein werden (Carr, 2013). Aufgrund des niedrigeren Luftdruckes verringert sich die Wärmeleitung, wodurch die Temperaturen innerhalb des Kameragehäuses steigen. Auch aufgrund dieser Überlegung wurde das Gehäuse nach dem erfolgreichen Test der ersten Kupferrohrverbindung weiterentwickelt. Die höhere Sonneneinstrahlung von etwa  $1200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  (Carr, 2013) in Kombination mit der dünneren Umgebungsluft wird im Vergleich zu den gemessenen Werten, zu einer weiteren Aufheizung des Gehäuses führen. Zum Schutz der CCD-Kamera wird empfohlen, das Gehäuse vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen und die Kamera tagsüber abzuschalten.

Als Abschluss dieser Arbeit möchte ich einen Ausblick geben, wie das endgültige Kameragehäuse aussehen könnte. Da sich der Aufbau von Konfiguration E mit den Kupferrohren, den Kühlrippen, dem Kühlkörper sowie der Montageplatte als vergleichsweise aufwendig gestaltet, wurde versucht, die Anzahl an Einzelteilen zu reduzieren, ohne die Kühlleistung des Gehäuses zu verringern. Das entstandene

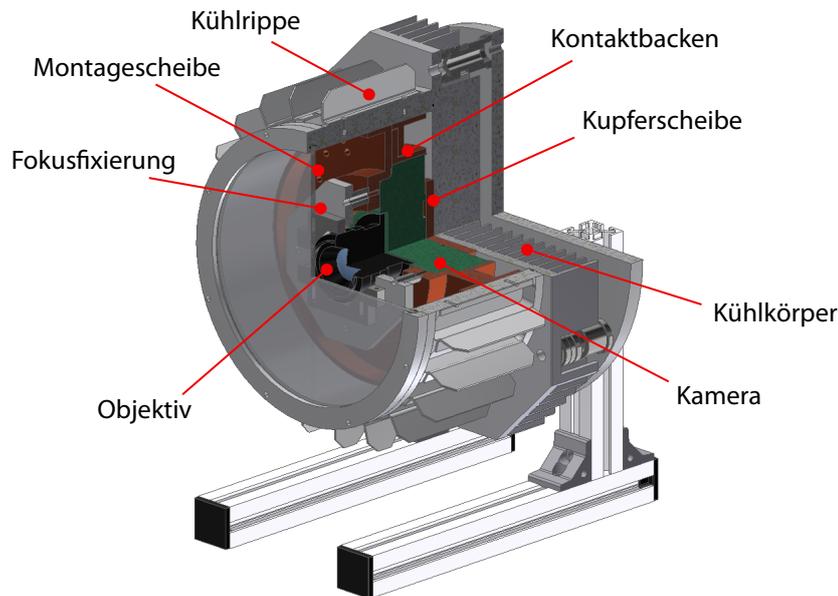


Abbildung 4.1: Möglicher Aufbau eines weiterentwickelten Kameragehäuses im Viertelschnitt. Gehäuse gekürzt, Anzahl der Kühlrippen erhöht, Kupferrohrkonstruktion durch einfache in Rückplatte eingelassene Kupferscheibe ersetzt und Rückplatte durch Kühlkörper ersetzt.

Konzept ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die maßgeblichen Veränderungen sind: das Ersetzen der Rückplatte durch eine Kühlkörper, eine am Peltier-Element angeschraubte und in den Kühlkörper eingelassene Kupferscheibe anstelle der Kupferrohrverbindung sowie eine verkürzte Gehäuselänge. Da ein verkürztes Gehäuse eine geringere Mantelfläche aufweist, muss die Anzahl an Kühlrippen erhöht werden, um einen identischen Wärmeübergang zwischen Gehäuse und Umgebungsluft zu gewährleisten.

Alternativ zur Montagescheibe und den Kontaktbacken aus Kupfer ließe sich eine passgenaue Aluminiumscheibe in Betracht ziehen, in die die Kamera eingesetzt wird. Die Vorteile einer Aluminiumscheibe gegenüber dem Aufbau aus Kupfer wären ein geringeres Gewicht, geringere Materialkosten sowie eine Reduzierung an Bauteilen. Dagegen spricht eine geringere Wärmeleitfähigkeit von Aluminium im Vergleich zu Kupfer.

Bevor sich für einen finalen Gehäuseaufbau entschieden wird, müssen weitere Tests durchgeführt werden. Diese Studie dient somit auch als Orientierung für kommende Gehäuseprototypen.

# A Datenblätter

## A.1 Kamera



**ASPEN® CG8300**  
High Performance  
Cooled CCD Camera System

---

**DESCRIPTION**

Aspen® is the newest in design innovation from Apogee Imaging Systems. Aspen® increases cooling performance in a smaller package, improves stray light baffling, adds a Network interface with a built-in web server, supports dual output CCDs up to 16Mhz and sets a new standard in shutter reliability. The Aspen® CG8300 uses a medium format 8-megapixel Truesense Imaging sensor, ideal for applications requiring a large field of view with a smaller pixel.

All Aspen® systems are backed by a 2 year warranty on the camera and 3 year warranty on the CCD chamber integrity.



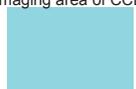


**CCD SPECIFICATIONS**

<b>CCD</b>	Kodak KAF-8300
<b>Array Size (pixels)</b>	3326 x 2504
<b>Pixel Size</b>	5.4 x 5.4 microns
<b>Imaging Area</b>	18 x 13.5mm (243mm <sup>2</sup> )
<b>Imaging Diagonal</b>	22.5mm
<b>Linear Full Well (typical)</b>	25.5K electrons
<b>Dynamic Range</b>	64.4dB
<b>QE at 400nm</b>	30%
<b>Peak QE (580, 660nm)</b>	60%
<b>Anti-blooming</b>	1000X

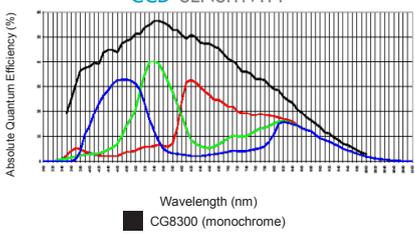
- 16-Bit digitization
- USB and Ethernet interface
- Programmable cooling up to 60°C below ambient
  - High reliability shutter (>5 million cycles)
  - 32 MByte camera memory
- Subarray readout and fast sequencing modes
- Adjustable fan speed for low/zero vibration
- General purpose programmable I/O port
  - Programmable status indicators
  - 32/64 bit ActiveX drivers included
  - Field upgradeable firmware
  - AR coated silica windows
- Precision locking filter wheels optional

Imaging area of CCD



18 x 13.5mm

**CCD SENSITIVITY**



Wavelength (nm)

■ CG8300 (monochrome)

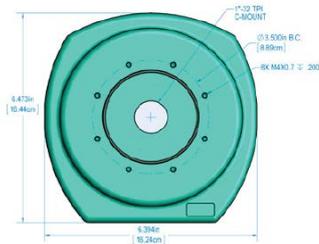
©2014 Apogee Imaging Systems

Abbildung A.1: Datenblatt Kamera. Seite 1

SYSTEM SPECIFICATIONS

<b>PC Interface</b>	USB 2.0; Network interface with built-in web server, up to 2MHz throughput	<b>Temperature Stability</b>	+/- 0.1°C
<b>Digital Resolution</b>	16 bit	<b>Operating Environment</b>	-25° to 40°C. Relative humidity: 10 to 90% non-condensing.
<b>System Noise (typical)</b>	9 e- RMS at 1 MHz.	<b>Power</b>	50W maximum power with cooling maximum. AC/DC "brick" supply with int'l AC input plug (100-240V, 50-60Hz). Alternate 12V input from user's source.
<b>Pixel Binning</b>	1 x 1 to 8 x 2504 on chip	<b>Remote Triggering</b>	LVTTL trigger input, expose strobe output.
<b>Exposure Time</b>	100 milliseconds to 183 minutes (2.56 microsecond increments)	<b>Camera Head Size</b>	Standard: G01 . Aluminum, hard teal anodized. 6.5" x 6.4" x 4.3" (16.4 x 16.2 x 10.9 cm). Weight: 3.1 lb. (1.4 kg).
<b>Image Sequencing</b>	1 to 65535 image sequences under software control	<b>Back Focal Distance</b>	Standard: 0.68" (1.72 cm) [optical]
<b>Frame Sizes</b>	Full frame, subframe	<b>Mounting</b>	1" Aperture, & C-mount 1-32 UN-2B Thread
<b>Cooling (typical)</b>	Thermoelectric cooler with forced air. Maximum cooling up to 60°C below ambient temperature.	<b>Shutter</b>	Standard (G01): 35mm.
<b>Dark Current (typical)</b>	0.02 e-/pixel/sec (-30°C)		

CONFIGURATION OPTIONS



Standard: G01



Ordering Information

Product Description                      Part Code  
 Aspen CG8300 grade S 35 mm Shutter      CG8300-S-G01-S35

For further information:  
 Web: www.ccd.com  
 E-mail: sales@ccd.com

Apogee Imaging Systems

425 Sullivan Avenue  
 Suite # 3  
 South Windsor  
 CT 06074  
 USA

CG8300 1114 R1

CG8300

Abbildung A.2: Datenblatt Kamera. Seite 2

## A.2 Voltcraft



### VOLTcraft® - TOP PERFORMANCE IN EVERY WAY

"For more than 25 years, our product range has been dynamically adapting to the constant changes in the industry. We commit to offering first-class quality to our customers while delivering an excellent cost-performance ratio. This philosophy remains the cornerstone of Voltcraft's success."

## PL-125-T4 DIGITAL THERMOMETER

CE  
VERSION 10/14

Nº 1013036

Robust thermometer with soft rubber case for type K and type J thermo-elements. The large illuminated display and the function keys arranged on the sides enable an ergonomic usage. The integrated real-time clock the MIN/MAX/AVG values with time stamp can be read, so considerably easier for long-term monitoring. In addition to the included wire sensors (1 pc. per channel) all type K and J temperature sensors with miniature thermo-element plug can be connected.

#### FEATURES:

4 channels // For thermo elements type-K/J //  
MAX/MIN/AVG with time stamp // Data hold for 18000  
measurement values // USB interface //

#### EQUIPMENT:

Temperature display in °C, °F or K // Auto-power-off-  
function // Difference measurement (T1-T2 or T3-T4).

#### PACKAGE CONTENTS:

PL-125-T4 // 4x type-K-wire sensor (-20 to +250 °C) //  
3 Batteries (AAA) // USB cable // Voltsoft standard  
software-CD // Operating instructions.

#### TECHNICAL DATA:

Model:	4 Channel
Temperature range:	Type K: -200 to +1372 °C
Type J: -210 to +1100 °C	0.2 V - 500 V
Temperature resolution:	0.1 °C
Basic accuracy:	±(0.15% + 1 °C)
Sensor type:	K/J
Interface:	USB
Power supply:	3 micro batteries (AAA)
Dimensions (W x H x L):	62 x 28 x 162 mm
Weight:	184 g



**Legal notice**  
This data sheet is published by Conrad Electronic SE, Klaus-Conrad-Str. 1, D-92240 Hirschau (www.conrad.com).  
All rights including translation reserved. Reproduction by any method, e.g. photocopy, microfilming, or the capture in electronic data  
processing systems require the prior written approval by the editor. Reprinting, also in part, is prohibited.  
This data sheet represent the technical status at the time of printing.  
© Copyright 2014 by Conrad Electronic SE V3\_1014\_02/VTP

Abbildung A.3: Datenblatt Voltcraft PL-125-T4USB VS



## Literatur

- [Actis et al. 2011] ACTIS, M.; AGNETTA, G.; AHARONIAN, F. et al.: Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. In: *Experimental Astronomy* 32 (2011), Dezember, S. 193–316. <http://dx.doi.org/10.1007/s10686-011-9247-0>. – DOI 10.1007/s10686-011-9247-0
- [Astro.desy.de 2015] ASTRO.DESY.DE: *DESY - AT - Graphics, Animation and FAQ Video Clips of the CTA Project*. [https://astro.desy.de/gamma\\_astronomy/cta/media/about\\_cta/index\\_eng.html](https://astro.desy.de/gamma_astronomy/cta/media/about_cta/index_eng.html). Version: 2015. – Zuletzt aufgerufen: 10.06.2015
- [Atwood et al. 2009] ATWOOD, W. B.; ABDO, A. A.; ACKERMANN, M. et al.: The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. In: *The Astrophysical Journal* 697 (2009), Nr. 2, 1071. <http://stacks.iop.org/0004-637X/697/i=2/a=1071>
- [Bietenholz 2013] BIETENHOLZ, W.: The most powerful particles in the Universe: a cosmic smash. In: *ArXiv e-prints* (2013), Mai. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013arXiv1305.1346B>. – Zuletzt aufgerufen: 26.06.2015
- [Böge 2011] BÖGE, Alfred: *Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 20. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag — Springer, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9898-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9898-2>. – ISBN 978-3-8348-1025-0 (Print) 978-3-8348-9898-2 (Online)
- [Carr 2013] CARR, John: *Environmental Requirements for CTA*. <https://www.cta-observatory.org/>. Version: 2013. – (intern Quelle) Zuletzt aufgerufen: 12.06.2015
- [Deil et al. 2008] DEIL, C.; VAN ELDIK, C.; FÖRSTER, A. et al.: H.E.S.S. II-Telescope Structure, Reflector and Drive System. In: AHARONIAN, F. A. (Hrsg.) ; HOFMANN, W. (Hrsg.) ; RIEGER, F. (Hrsg.): *American Institute of Physics Conference Series* Bd. 1085, 2008 (American Institute of Physics Conference Series), 693-695. – Zuletzt aufgerufen: 26.06.2015
- [Demtröder 2013] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik I - Mechanik und Wärme*. 6. Auflage. Kaiserslautern : Springer Verlag, 2013. – 271 – 286 S.
- [Eschbach 2014] ESCHBACH, Stefan: *Systematische Analyse zum Pointingverhalten des Cherenkov Telescope Arrays*, Erlangen Centre for Astroparticle Physics

- (ECAP) - Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2014
- [Fischerelektronik.de 2015] FISCHERELEKTRONIK.DE: *Kühlkörper, Gehäuse und Steckverbinder vom Hersteller*. [http://www.fischerelektronik.de/web\\_fischer/de\\_DE/K%C3%BChlk%C3%B6rper/A01/Standardstrangk%C3%BChlk%C3%B6rper/PR/SK49\\_/\\$productCard/additionalInfos/index.xhtml](http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/de_DE/K%C3%BChlk%C3%B6rper/A01/Standardstrangk%C3%BChlk%C3%B6rper/PR/SK49_/$productCard/additionalInfos/index.xhtml).l. Version: 2015. – Zuletzt aufgerufen: 21.06.2015
- [Gillesen 2004] GILLESSEN, Stefan: *Sub-Bogenminuten-genaue Positionen von TeV-Quellen mit H.E.S.S.*, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Diss., 2004
- [Halliday et al. 2009] HALLIDAY, D. ; RESNICK, R. ; WALKER, J.: *Physik*. 2. Auflage. Wiley-VCH, 2009. – 570 S. – ISBN 9783527406456
- [Herpich 2010] HERPICH, Jakob: *Testing a Single-CCD-Concept for the H. E. S. S. II Pointing*, Department of Physics and Astronomy University of Heidelberg, B. Sc. Thesis, 2010
- [Howell 2006] HOWELL, Steve B.: *Handbook of CCD Astronomy*. 2. Auflage. Cambridge University Press, 2006 <http://dx.doi.org/10.1017/CB09780511807909>. – ISBN 9780511807909. – Cambridge Books Online
- [Lennarz 2012] LENNARZ, Dirk: *Transient Very-High-Energy Gamma-Ray Emission from Gamma-Ray Bursts and Supernovae*, Ruperto-Carola University of Heidelberg, Diss., 2012
- [Li u. Nathan 2005] LI, Flora M. ; NATHAN, Arokia: *CCD Image Sensors in Deep-Ultraviolet - Degradation Behavior and Damage Mechanisms*. 1. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 7–11 S.
- [Optcorp.com 2015] OPTCORP.COM: *OPT Telescopes*. <http://www.optcorp.com>. Version: 2015. – Zuletzt aufgerufen: 17.06.2015
- [Specovius 2014] SPECOVIVUS, Andreas: *Charakterisierung einer astronomischen CCD-Kamera im Rahmen des CTA-Projekts*, Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP) - Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, B. Sc. Thesis, 2014

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich bei der Entwicklung des Kameragehäuses und der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt:

- Prof. Dr. Christopher van Eldik für die stets gute Betreuung.
- Prof. Dr. Gisela Anton für die Übernahme des Koreferats.
- Domenico Tiziani für die gute Betreuung, die Hilfe bei programmiertechnischen Problemen sowie das Korrekturlesen dieser Arbeit.
- Dipl.-Ing. Klaus Kärcher für das Einbringen jahrelanger Erfahrung sowie das Erstellen sämtlicher Konstruktionspläne.

## **Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Erlangen, den 29. Juni 2015

---

(Philipp Hofmann)