

**STUDIEN ZUR ENTWICKLUNG EINES
TEMPERATUR-FERNDIAGNOSESYSTEMS
FÜR ATLAS-MDT-KAMMERN**

Diplomarbeit

vorgelegt der

Fakultät für Physik der
Ludwig-Maximilians-Universität München

von

Martina Reithmeier

München, den 31. März 2008

**Studien zur Entwicklung eines
Temperatur-Ferndiagnosesystems
für ATLAS-MDT-Kammern**



Diplomarbeit

vorgelegt der
Fakultät für Physik der
Ludwig-Maximilians-Universität München

von

Martina Reithmeier

München, den 31. März 2008

1. Gutachter:
2. Gutachter:

Prof. Dr. Otmar Biebel
Prof. Dr. Martin Faessler

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Methoden zur berührungslosen Temperaturbestimmung von hochreflektierendem Aluminium. Diese wurde im Hinblick auf den möglichen Einsatz von Infrarotkameras im ATLAS-Experiment zur Detektion von „Hot Spots“ unternommen. Es werden verschiedene Methoden dargelegt, wie der Emissionsgrad ϵ_{Alu} von gewalztem, hochreflektierendem Aluminium bestimmt werden kann, wie es im ATLAS-Myonspektrometer zu Einsatz kommt. Für den Einsatz von Infrarot-Kameras werden die zugehörigen theoretischen Gesetzmäßigkeiten so weiterentwickelt, dass sich daraus Methoden zur Temperaturbestimmung ergeben. Die nötigen Grundlagen werden in Experimenten überprüft und aufbauend auf den Resultaten Fehlerabschätzungen gegeben. Auch wird überprüft, ob die Messbedingungen im Detektor geeignet für IR-Detektoren sind. Schlussendlich wird gefolgert, das und wie anhand der hier gezeigten Resultate eine Temperaturmessung im ATLAS-Detektor unter den gegebenen Bedingungen möglich ist.

Inhaltsverzeichnis

1	ATLAS-Myonendetektor des LHC	1
1.1	Einführung in das Myonspektrometer am Atlas Detektor	1
1.2	Die Monitored Drift Tube Kammern	2
1.3	Hitzeentwicklung im Detektor	3
2	Theorie	7
2.1	Wellenlängenbereiche der Infrarotstrahlung	7
2.2	Das Stefan-Boltzmann-Gesetz	8
2.3	Der funktionale Aufbau einer Wärmebildkamera	9
2.4	Indirekte Messmethode	13
2.5	Direkte Messmethode	15
3	Die Infrarotkameras	17
3.1	TI20 von Fluke	17
3.2	TH9100pro	18
4	Arbeitsweise der IR-Kamera Betriebs- und Computerauswertesoftware	21
4.1	Abstandsmessung und Standardabweichung	22
4.2	Emissionsgradvariationsmessung	23
4.3	Hintergrundkorrektur	25
5	Die Infrarotkamera im Magnetfeld	27
5.1	Die Infrarotkamera TI20 im Magnetfeld	27
6	Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers	33
6.1	Kalibrierungsmessung Thermometer	33
6.2	Maximale Temperaturauflösung der Kameras	35
6.3	Die elektronischen Komponenten der MDT-Kammern	36
6.4	Indirekte Emissionsgradbestimmung ϵ_{Alu}	39
6.5	Direkte Emissionsgradbestimmung ϵ_{Alu}	43
6.6	Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades	45
6.7	Einflussnahme von heißer Luft auf die Messungen.	47
6.8	Vorzugsrichtung des Protective Covers	49
6.9	Emissionsgrade verwendeter Bestandteile im ATLAS-Experiment	52
6.10	Einfluss der Streuung auf die Messungen - Methode 1	52
6.11	Einfluss der Streuung auf die Messungen - Methode 2	55

Inhaltsverzeichnis

7	Temperaturen der MDT-Kammern	59
7.1	Die Struktur der Rohrlagen und die Öffnung im Longbar	59
8	Temperaturbestimmungsmethoden für ATLAS	69
8.1	Die direkte Messmethode	69
8.2	Erwärmungs-Methode	70
8.3	Objekttemperaturbestimmung im zeitl. Verlauf	72
8.4	Welche Messung für welche Umstände	73
9	Zusammenfassung und Ausblick	75
A	Detektor der TH9100pro	77
B	Erste Emissionsgradmessung	79
B.1	Erste Emissionsgradmessung	79
B.2	Berechnung des Transmissionsgrads von Wasserdampf $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$	79
C	Fehlerrechnung zu T_O und K	81
D	Tabellen zur Fehlerabschätzung zu Kapitel 8	85
	Literaturverzeichnis	89

1 Der Myonendetektor des ATLAS-Experiments am Large Hadron Collider am Cern

„Ich bin auf einen Berg gestiegen um in das ferne Tal zu blicken“

Anonym

1.1 Einführung in das Myonspektrometer am Atlas Detektor

Das Standardmodell der Teilchenphysik kann eine Vielzahl von Beobachtungen erklären und wurde durch ein breites Spektrum von Versuchen bestätigt [1]. Es gibt jedoch theoretische Erweiterungen zum Standardmodell, die bisher noch nicht experimentell bestätigt werden konnten. Dazu zählt zum Beispiel die Supersymmetrie, die einige mathematische Unzulänglichkeiten im Standardmodell elegant umgehen könnte. Die meisten Erweiterungen des Standardmodells sagen Teilchen mit so hohen Ruhemassen vorher, dass deren Existenz bisher nicht überprüft werden konnten. Die einzige Möglichkeit momentan diese Theorien experimentell zu überprüfen, besteht darin, Beschleuniger für immer höhere Energien zu bauen. Die Hoffnung, diese schweren Teilchen zu erzeugen, ist der Proton-Proton-Speicherring LHC, der mit einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV in einen bisher unerforschten Bereich vordringen wird. Einer der LHC-Detektoren, ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), legt dabei ein besonders hohes Gewicht auf eine genaue Spurvermessung der entstehenden Myonen, was sich in der Größe des Myonspektrometers bemerkbar macht. In Figur 1.1 ist eine Abbildung des Detektors zu sehen, die die Größenverhältnisse erkennen lässt: Der Detektor ist 46m lang, 22m hoch und hat ein Gesamtgewicht von 7000t, Dimensionen in welche der Münchner Forschungsreaktor FRM II vollständig eingehüllt würde. Der Aufbau hat eine für Hochenergiedetektoren typische Schalenstruktur.

Die größte Detektorkomponente des ATLAS-Experiments ist das Myonspektrometer, in welchem die Teilchen nachgewiesen werden sollen, die nicht im Kalorimeter gestoppt wurden. Es dringen fast nur Myonen, aufgrund des viele Strahlungslängen dicken Kalorimeters, aus dem Wechselwirkungspunkt bis ins Myonspektrometer. Hauptziel ist es, den Impuls der Teilchen möglichst präzise zu messen. Dafür werden drei Lagen verschiedener Myonendetektoren benutzt, die in einem toroidalen Magnetfeld liegen. Genauso wie im Spurdetektor kann aus der Krümmung der Myonspuren im Magnetfeld des Toroidmagneten der Impuls gemessen werden. In Abb. 1.1 ist das Myonspektrometer blau eingezeichnet. Im Endkappenbereich besteht es aus drei Rädern MDT-Kammern mit einem Abstand von 6m. Im Fassbereich gibt es drei Lagen aus Monitored Drift Tube (MDT) Kammern. Zusätzlich befindet sich vor und teilweise hinter den mittleren und äußeren MDT-Kammern eine Triggereinheit aus Resistive Plate Chambers (RPCs). Durch dieses eigenständige Triggersystem liefert das Myonspektrometer einerseits einen wichtigen Beitrag zum

1 ATLAS-Myonendetektor des LHC

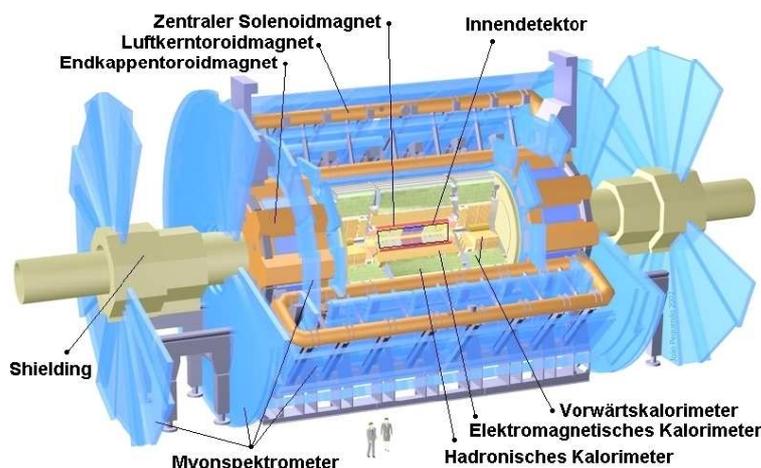


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des ATLAS-Detektors. Hierbei sind die blaugefärbten Bereiche die Myonendetektoren.

Trigger des gesamten Detektors und andererseits die Möglichkeit des Stand-Alone-Triggers für die leptonischen oder semi-leptonischen Zerfälle. Außerdem liefern die Triggerkammern noch eine Ortsinformation längs der Driftrohre und erhöhen somit die Genauigkeit der Spurrekonstruktion.

1.2 Die Monitored Drift Tube Kammern

Die einzelnen Lagen des Myonspektrometers bestehen aus einzelnen Detektormodulen von Driftrohren, den so genannten (Monitored Drift Tube) MDT-Kammern, die zwischen 1 m und 6 m lang und 2 m bis 3 m breit sind. Jede MDT-Kammer besteht aus zwei Multilagen mit jeweils drei oder vier Einzelrohrlagen (siehe Abb. 1.2). Die einzelnen Röhren haben einen Durchmesser von 3 cm und eine Wandstärke von $400\mu\text{m}$. Die MDT-Kammern sind, je nach Lage im Detektor, in verschiedene Typen eingeteilt. BOS steht zum Beispiel für Barrel Outer Small und bezeichnet einen Kammer Typ der äußersten Detektorlage im Fassbereich. 102 Stück dieser BOS-Kammern für ATLAS wurden in München hergestellt. Davon verblieben 14 Stück in München, um weitere Messungen daran vornehmen zu können. Bei den hochenergetischen Reaktionen im LHC können Myonen entstehen, deren Impuls im Bereich über $1\text{TeV}/c$ liegen kann, und die deshalb von dem Magnetfeld $B = 0,5\text{T}$ des Atlasdetektors kaum abgelenkt werden. Deshalb wird eine Spurrekonstruktion mit einer Ortsauflösung von $50\mu\text{m}$ benötigt. Auch die Position der Rohre untereinander müssen mit derselben Präzision bekannt sein. Deshalb gibt es ein optisches Vermessungssystem (RasNik [2]), mit dem thermische Verformungen der Kammer gemessen und später softwareseitig korrigiert werden können.

In der Mitte eines Driftrohres befindet sich ein goldbeschichteter Wolfram-Rhenium-Draht mit $50\mu\text{m}$ Durchmesser, der über die gesamte Länge des Driftrohres freitragend hängt und an den

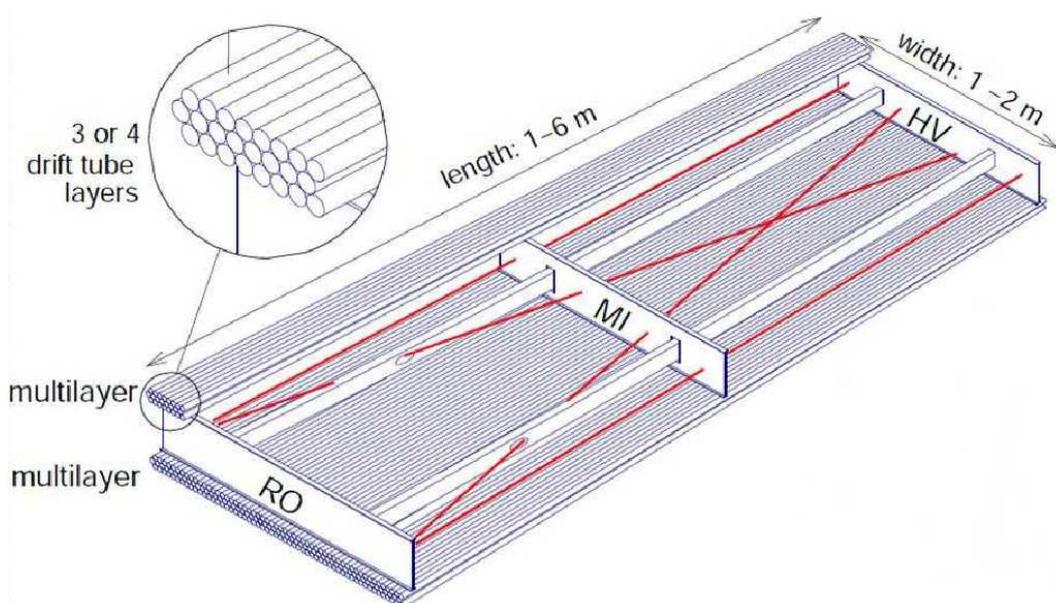


Abbildung 1.2: Zum Monitorsystem der Monitored Drift Tube (MDT) Kammern. Die rot schematisierten Lichtstrahlen stellen das optische Alignierungssystem der Kammer dar, die Kombination von Längs- und diagonalen Strahlen erlauben es, thermisch bedingte ungleichmäßige Deformationen und Verwindungen der Kammer zu monitoren und softwareseitig zu kompensieren. Gut sichtbar sind die sechs Lagen von je 72 Driftrohren, welche in zwei Multilagengruppen angeordnet sind.

Enden mit einer Kraft von insgesamt 3,5 N (Newton) gespannt wird. Als Zählgas wird eine Mischung aus 93% Argon und 7% CO₂ bei einem Druck von 3 bar absolut verwendet. Zwischen dem Draht und der Rohrwand liegt eine Spannung von 3080 V an. Wenn nun ein ionisierendes Teilchen das Detektorgas durchquert, erzeugt es entlang seiner Spur Elektron/Ionenpaare, wobei die Elektronen Richtung Draht driften, wie in Abb. 1.3. Nahe dem Draht gelangen die Elektronen in den Bereich der Gasverstärkung, da das elektrische Feld so stark wird, dass ein Elektron zwischen zwei Stößen genug Energie aufnehmen kann, um das umliegende Zählgas zu ionisieren. Die dadurch neu entstandenen freien Elektronen werden ebenfalls beschleunigt und führen lawinenartig zu einer typischen Ladungsvervielfachung von in diesem Fall $2 \cdot 10^4$. Diesen Effekt nennt man Gasverstärkung [3, 4, 5, 6, 7].

Jede MDT-Kammer besitzt nicht nur verschiedene Rohrlagen und ein Alignierungssystem sondern auch sogenannte Longbars, das ist eine Stützstruktur die zwischen den Rohrlagen entlang verläuft (siehe Abb. 1.2), und über Protective Cover, welche auf der Außenseite zum Schutz auf den Rohren angebracht sind

1.3 Hitzeentwicklung im Detektor

Das gesamte Experiment und somit auch die MDT-Kammern werden durch die Abwärme der weiter innen liegenden Detektor-Komponenten erwärmt. Trotz Zwangsbelüftung wurden in [8]

1 ATLAS-Myonendetektor des LHC

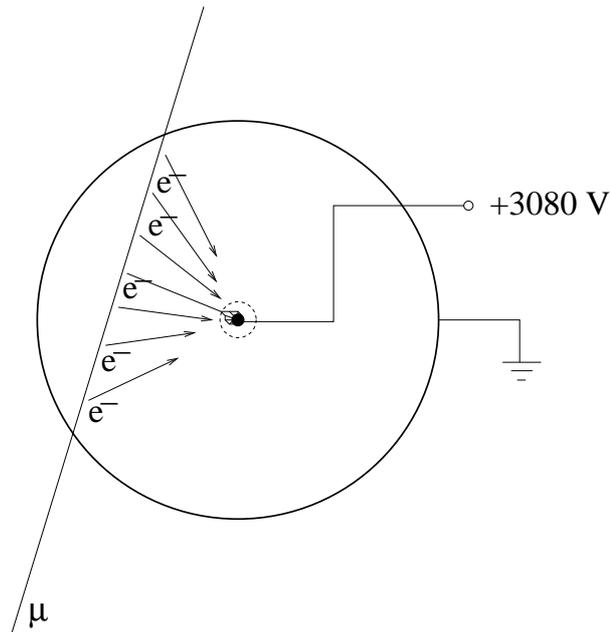


Abbildung 1.3: Ein Myon ionisiert entlang seiner Bahn, die Elektronen treffen auf weitere Gasatome, ionisieren diese wieder, bis sie am positiv geladenen Draht als meßbare Ladungen abfließen [3].

vertikale Temperaturgradienten von 20°C abgeschätzt, siehe Abb. 1.4. Dadurch werden die Messungen der Myonspuren beeinflusst.

Um sicherzustellen, dass die vom ATLAS-Detektor, vor allem von den MDT-Kammern, gewonnenen Daten mit Hilfe der rt -Relation richtig ausgewertet werden [6, 7], sollten die heißen Zonen im Detektor ermittelt werden.

Die auf Raumtemperatur geeichten MDT-Kammern reagieren auf Temperaturänderungen und verändern ihre Form und ihr Ausleseverhalten. Im vermessenen Temperaturbereich von 21°C bis 42°C nimmt die maximale Driftzeit linear mit $2,21 \text{ ns/K}$ ab [9] und die Gasverstärkung nimmt um $2,1\%$ pro Kelvin zu. Schlimmstenfalls führt zu starke Hitze zum Ausfall der Komponenten (nicht nur der geklebten MDT-Kammern, sondern beispielsweise auch der RPCs). Deshalb wurde versucht eine unabhängige Remote-Methode zur Temperaturmessung des Experiments zu entwickeln, um unabhängig zu den Temperatursensoren sogenannte Hotspots aufspüren zu können.

Die Simulationen, welche vom CFD Simulations-Team des CERNs im Jahre 2004 [8, 10], mit Hilfe des Computational Fluid Dynamics Model erstellt wurden, zeigen, dass sich an bestimmten Stellen Temperaturen von bis zu 94°C [11] ergeben können. Es muss mit noch höheren Temperaturen gerechnet werden, da die Erfahrung zeigt, dass Simulationen oft unter zu stark vereinfachten Annahmen erstellt werden. Deshalb werden in dieser Arbeit verschiedene Ansätze vorgestellt, die oben genannten Temperaturen vorwiegend an Aluminium mit Hilfe einer Infrarotkamera (IR-Kamera), sensitiv im Bereich von 8 bis $13 \mu\text{m}$, zu messen, um dann geeignet auf aufgespürte heiße Zonen im Experiment reagieren zu können.

1.3 Hitzeentwicklung im Detektor

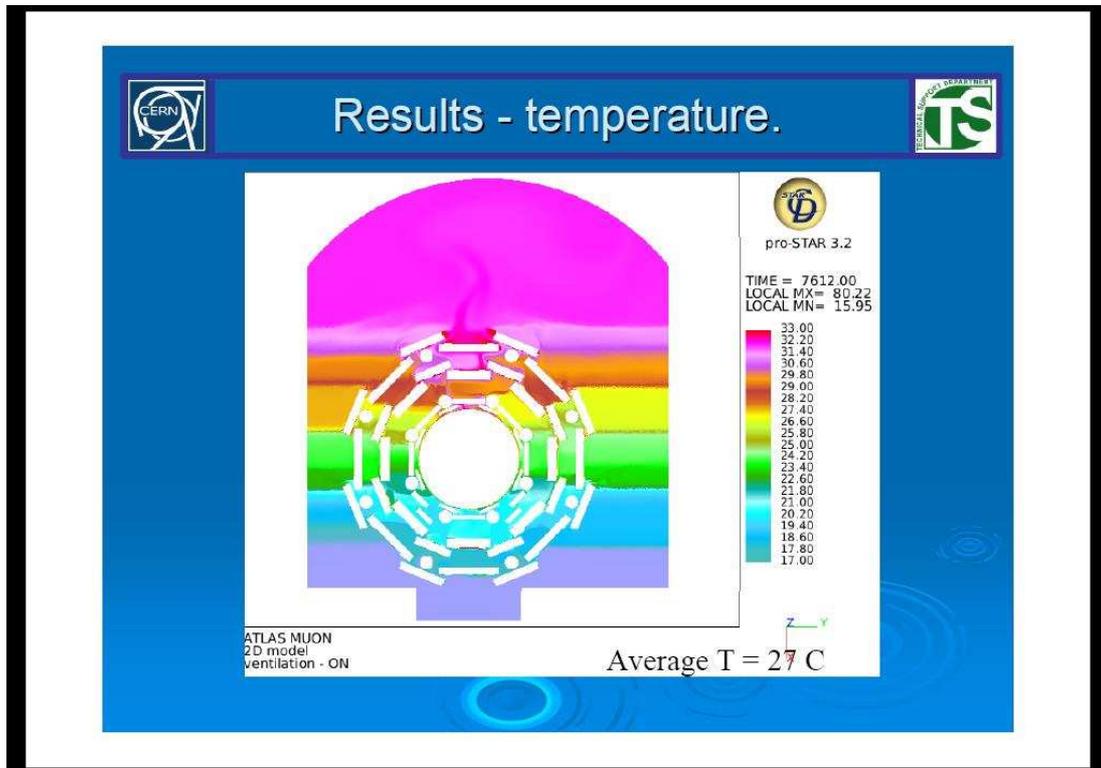


Abbildung 1.4: Simulation der MDT-Kammer Temperaturschichtung während des Betriebs

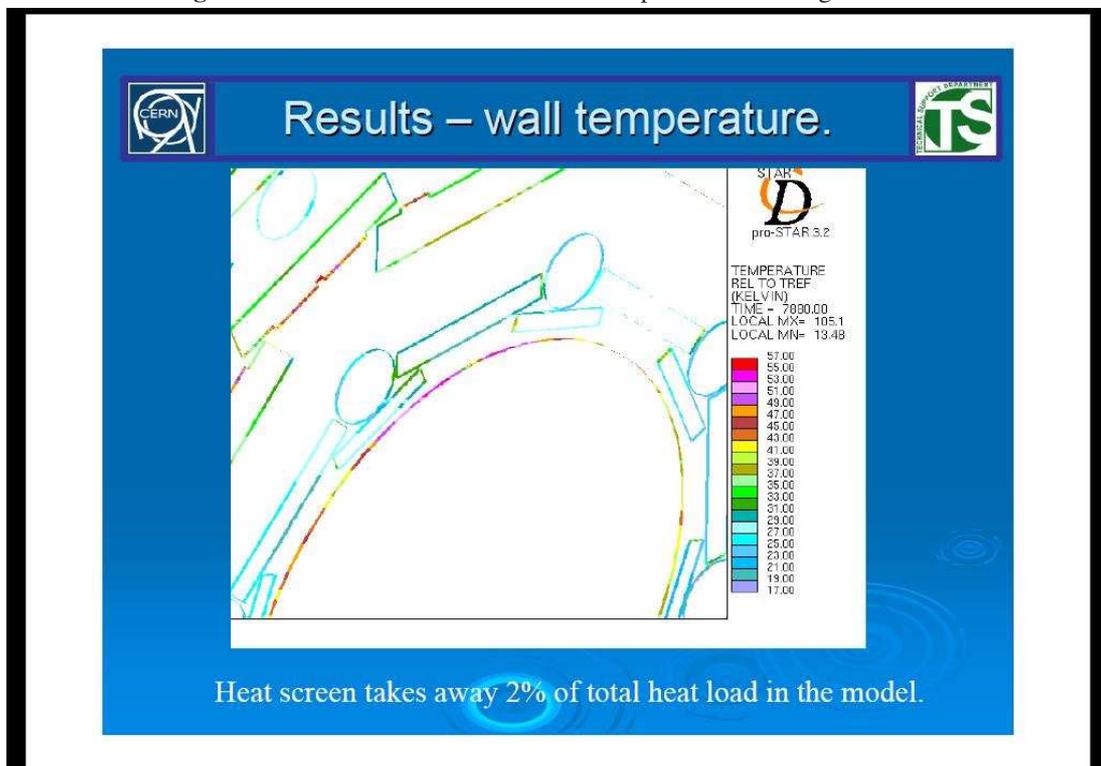


Abbildung 1.5: Detailansicht der Oberflächentemperaturen der obersten MDT-Sektoren

1 ATLAS-Myonendetektor des LHC

2 Theorie

„Ein Problem ist halb gelöst, wenn es klar formuliert ist.“

John Dewey, (1859-1952)

2.1 Wellenlängenbereiche der Infrarotstrahlung

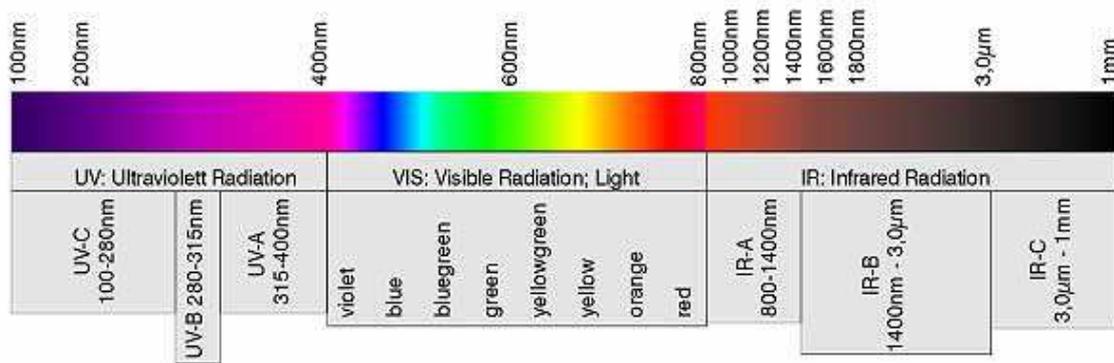


Abbildung 2.1: Diese Abb. zeigt den Spektralbereich vom UV-Bereich bis zum Ende der Infrarotstrahlung. Dort beginnt der Mikrowellenbereich [12].

Als Infrarotstrahlung wird der Wellenlängenbereich zwischen sichtbarem Licht ab ca. 780 nm und langwelligeren Mikrowellen bis ca. 1 mm bezeichnet. Je nach Literatur [13, 14, 15] finden sich unterschiedliche Definitionen für die nähere Einteilung von Infrarotstrahlung.

Bei kurzweiliger IR-Strahlung (ab 780 nm) spricht man oft von nahem Infrarot (near infrared, NIR), bei Wellenlängen von ca. 1 bis 7 μm von mittlerem Infrarot (mid infrared, MIR). Bei langwelligerer Strahlung von ca. 8 bis 15 μm von langwelligem Infrarot (longwave infrared, LIR) und darüber hinaus von ca. 15 μm bis 1 mm als extrem langwelliges oder fernes Infrarot (FIR).

Darüberhinaus gibt es noch die Einteilung des DIN (Deutsches Institut für Normierung) [17].

- IR-A 0,78 bis 1,4 μm wird beschränkt durch die Wasserabsorption und wird aufgrund der geringen Absorption und Dispersion durch Glasfasern in der Telekommunikation verwendet.
- IR-B 1,4 bis 3 μm . Die Wasserabsorption steigt bei 1450 nm stark an.

2 Theorie

- IR-C bezeichnet das restliche mittlere (MIR), langwellige (LIR) und ferne Infrarot (FIR), also den Bereich um $3\mu\text{m}$ bis 1mm

Die Wellenlänge, die wir in dieser Arbeit betrachten, liegt zwischen 7 und $14\mu\text{m}$, im langwelligen Infrarot also.

Das Wellenlängenmaximum eines schwarzen Körpers bei gegebener Temperatur berechnet sich nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz [13]:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2897,8\mu\text{m} \cdot \text{K}}{T} . \quad (2.1)$$

Für die hierin betrachteten Temperaturen von grob 0°C bis 70°C ergibt sich damit ein Wellenlängenbereich von $\lambda_0 = 10,5\mu\text{m}$ bis $\lambda_{70} = 8,4\mu\text{m}$.

2.2 Das Stefan-Boltzmann-Gesetz

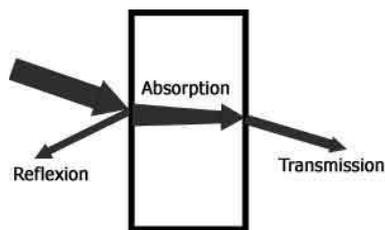


Abbildung 2.2: Trifft Licht auf einen Körper, so wird ein Teil reflektiert, ein weiterer absorbiert und ein dritter durch das optische Medium durchgeleitet (transmittiert). Aufgrund der Energieerhaltung gilt: Die Summe aus dem Absorptionsgrad (= Emissionsgrad), dem Transmissionsgrad und dem Reflexionsgrad ist gleich Eins. [18]

Ein schwarzer Körper absorbiert alle elektromagnetische Strahlung, die auf ihn trifft. Die von ihm abgestrahlte thermische Leistung P beträgt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (SBG) in Abhängigkeit seiner Temperatur T [K] und der emittierenden Fläche A [m^2], sowie der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma_{\text{B}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$

$$P = A \cdot \sigma_{\text{B}} \cdot T^4 . \quad (2.2)$$

Ein grauer Körper absorbiert einen festen Anteil ε (Absorptionskoeffizient) der einfallenden Strahlung. Seine Emission beträgt nach dem SBG für graue Körper

$$P = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma_{\text{B}} \cdot T^4 . \quad (2.3)$$

Der Absorptionskoeffizient ε ist dabei auch Emissionskoeffizient (Kirchhoffsches Strahlungsgesetz [15, 19]). Bei einem bunten Körper hängt dieser Emissionsgrad von der Wellenlänge ab.

Da Aluminium im hier betrachteten Wellenlängenbereich als grauer Strahler [20] fungiert, benutzen wir das SBG für graue Strahler.

2.3 Der funktionale Aufbau einer Wärmebildkamera

Wie sich später zeigt, ist es sinnvoll, die spezifische Leistung $p := \frac{P}{A \cdot \sigma_B}$ zu betrachten.

Wenn elektromagnetische Strahlung auf einen Körper trifft, so wird diese entweder transmittiert, reflektiert oder absorbiert. Daher gilt, dass Transmissionskoeffizient τ , Reflexionskoeffizienten r und Absorptionskoeffizient ε in Summe 1 ergeben müssen, (siehe Abb. 2.2). Da Aluminium keinerlei Strahlung im betrachteten Bereich durchlässt, ist $\tau = 0$ und es folgt $r = (1 - \varepsilon)$. Da die Reflexion am Aluminium des Protective Covers eine wesentliche Rolle spielt, erweitern wir unter Berücksichtigung der Hintergrundstrahlung mit der Temperatur T_{Um} ([13]):

$$p = \varepsilon \cdot T^4 + (1 - \varepsilon) \cdot T_{Um}^4 . \quad (2.4)$$

Das Messprinzip einer Wärmebildkamera beruht letztlich auf dem Stefan-Boltzmann-Gesetz, das thermische Leistung und Temperatur miteinander in Beziehung setzt.

2.3 Der funktionale Aufbau einer Wärmebildkamera

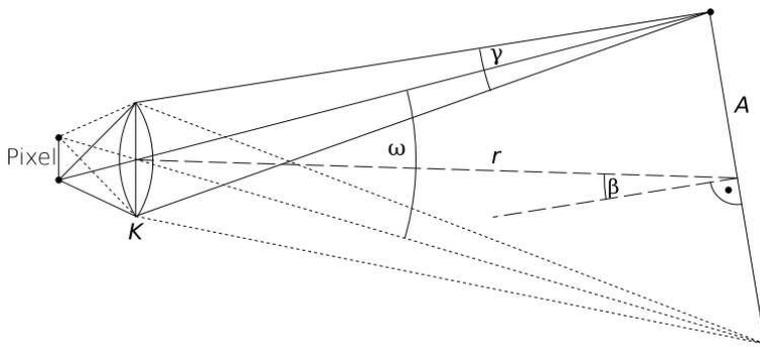


Abbildung 2.3: Durch die Linse (mit der Fläche K) wird die in Abstand r gelegene Fläche A unter dem Raumwinkel ω auf das Pixel abgebildet. Einem Punkt der Fläche A erscheint die Linse unter dem Raumwinkel γ . Daraus ergibt sich $A = \omega \cdot r^2$ und $\gamma = K/r^2$. Hierbei wurde der vereinfachte Fall mit $A \ll r^2$ und $K \ll r^2$ betrachtet.

Betrachtet man mit der Kamera einen grauen Körper im Abstand r mit der Temperatur T und dem Emissionskoeffizienten ε , so geht von diesem bei einer Hintergrundtemperatur T_{Um} die spezifische Leistung $p = \varepsilon \cdot T^4 + (1 - \varepsilon) \cdot T_{Um}^4$ aus. Wenn der Körper seine Strahlung diffus in alle Richtungen des Raumes abgibt, das heißt er ist ein Lambertischer Strahler, dann ist die Strahldichte $L \cdot \cos \theta$. Das Integral der Strahldichte über den Halbraum muss die spezifische Leistung $p \cdot \sigma_B$ ergeben. Daher gilt

$$p \cdot \sigma_B = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.5)$$

$$= \pi \cdot L . \quad (2.6)$$

Das bedeutet die spezifische Strahlstärke ist $L(r) = \frac{p \cdot \sigma_B}{\pi}$.

2 Theorie

Die Kamera fokussiert mit Hilfe der Optik, wie in Bild 2.3 dargestellt, die auf der Fläche K einfallende Infrarotstrahlung. In der Bildebene befinden sich IR-strahlungsempfindliche Elemente. Jedes dieser Elemente entspricht einem Pixel. So ein Pixel empfängt dabei die Infrarotstrahlung aus einem bestimmten Raumwinkel ω und misst deren Leistung. Wenn dieser Raumwinkel vollständig vom betrachteten Körper abgedeckt wird, so entspricht dies bei einem Betrachtungswinkel β zur Normalen einer Fläche $A = \omega \cdot r^2 / \cos \beta$ des Körpers. Die gesamte vom Pixel empfangene Leistung ergibt sich somit zu:

$$P_{\text{Pix}} = K \cdot A \cdot \frac{L \cdot \cos \beta}{r^2} \quad (2.7)$$

$$= \frac{K \cdot \omega \cdot r^2 \cdot p \cdot \sigma_B \cdot \cos \beta}{\cos \beta \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2.8)$$

$$= p \cdot \frac{K \cdot \omega \cdot \sigma_B}{\pi} \quad (2.9)$$

und ist deshalb unabhängig vom Abstand r . (Der Faktor $\frac{K \cdot \omega \cdot \sigma_B}{\pi} =: C$ ist abhängig von der Kamera aber konstant.)

Aus dem Zusammenhang

$$P_{\text{Pix}} = (\varepsilon \cdot T^4 + (1 - \varepsilon) \cdot T_{\text{Um}}^4) \cdot C \quad (2.10)$$

lässt sich bei gegebenem Emissionsgrad ε und Hintergrundtemperatur T_{Um} die Objekttemperatur

$$T_O := T = \left(\frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{P_{\text{Pix}}}{C} - (1 - \varepsilon) \cdot T_{\text{Um}}^4 \right) \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.11)$$

bestimmen.

Umgekehrt kann somit aus der für einen Pixel nach dieser Formel berechneten Temperatur T_{Pix} die Leistung ermittelt werden, die die Kamera für diesen Pixel gemessen hat. Wurde dabei $\varepsilon = 1$ verwendet, dann ist das besonders einfach. Die Hintergrundtemperatur T_{Um} spielt dann keine Rolle und es gilt

$$P_{\text{Pix}} = T_{\text{Pix}}^4 \cdot C \quad (2.12)$$

Diese Formel kann aber, da C unbekannt ist, nicht benutzt werden um die absolute Leistung zu bestimmen. T_{Pix}^4 kann jedoch als Maß für die relative Leistung angesehen und verwendet werden.

Die Funktion einer Wärmebildkamera lässt sich folglich auf das Messen der auf einen Detektor einfallenden Leistung zurückführen.

Der Detektor besteht aus einer Arraystruktur von IR-strahlungsempfindlichen Elementen (Mikrobolometern) und aus speziell angepassten Si-Multiplexschaltkreisen (hier CMOS), die durch Aufbau- und Verbindungstechniken mechanisch und elektrisch miteinander verbunden werden, siehe Abb. 2.4 und 2.5. Um diese IR-Arrays sind weitere elektronische Bauelemente zur Sensorsteuerung und -signalverarbeitung sowie optische und mechanische Komponenten (zum Beispiel Shutter, angepasste IR-Optiken) angeordnet [21].

2.3 Der funktionale Aufbau einer Wärmebildkamera

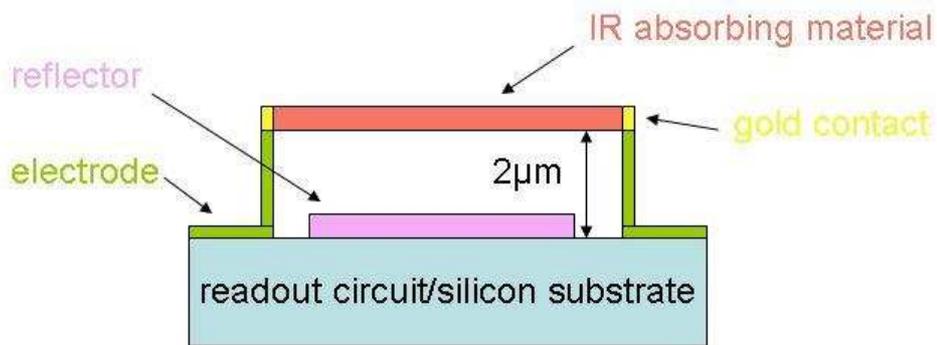


Abbildung 2.4: Prinzipieller Aufbau eines Microbolometerarrays. Hier besteht das Trägermaterial aus Silizium und einer integrierten Auslese-Halbleiterschaltung (ROIC). Unterhalb des Absorbermaterials wird ein Spiegel (zum Beispiel Titan) angebracht, da mancher Strahlungsanteil die Absorberschicht durchdringt, so wird die Ausbeute erhöht. [22]

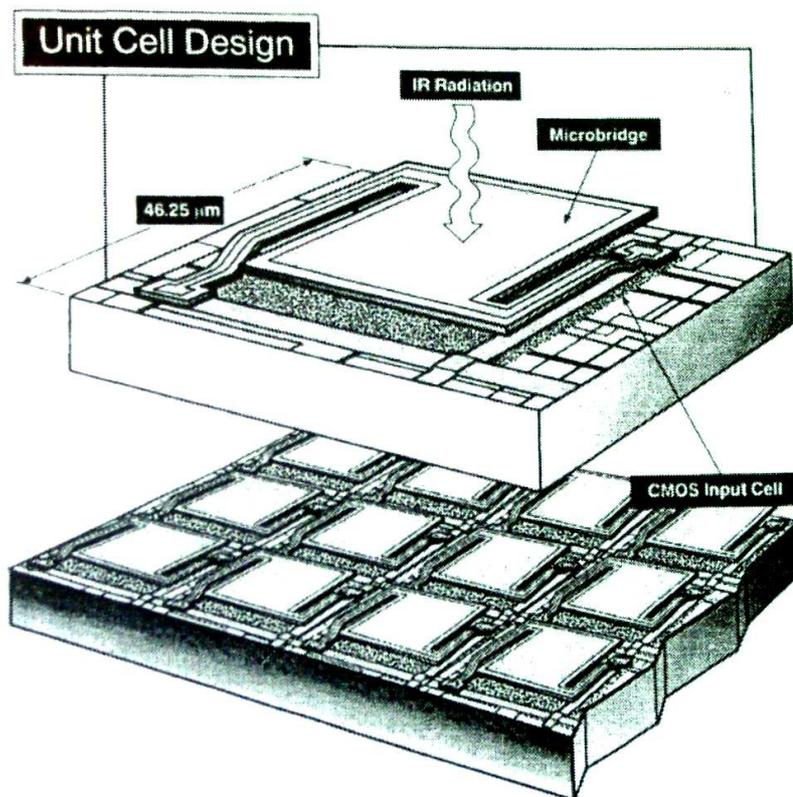


Abbildung 2.5: Ansicht eines Microbolometerarrays nach [23].

2 Theorie

Ein Mikrobolometer besteht aus einer Wheatstone-Brückenschaltung, siehe dazu Abb. 2.6, bei der ein Widerstand (Thermistor) der einfallenden Strahlung ausgesetzt ist, und ein zweiter, baugleicher nicht. Diese sind so geschaltet, dass die Brücke unbelastet ist, solange keine elektromagnetische Strahlung den Widerstand beeinflusst. Fällt nun aber Strahlung auf diesen, verändert sich sein Widerstand und es wird eine Spannungsänderung im System erzeugt. Diese hängt von der Wellenlänge und von der Leistung der einfallenden Strahlung ab.

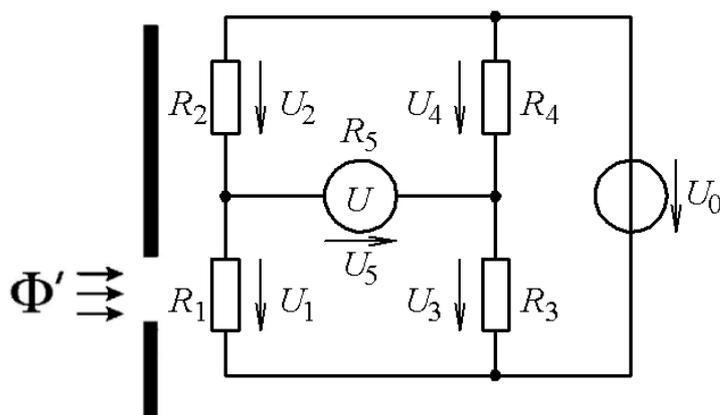


Abbildung 2.6: Aufbau der Wheatstone-Brücke. Jeweils zwei Widerstände bilden einen Spannungsteiler. Spannung am Widerstand R_1 wird mit Spannung am Widerstand R_3 verglichen, U_2 mit U_4 . Sind diese Spannungen gleich groß und R_5 ohne Stromfluß, ist die Brücke unbelastet. Fällt Strahlung(sfluss) Φ' auf R_1 , verstimmt sich die Brücke, es ergibt sich einen Spannungsabfall bei R_5 . [22]

Ein moderner Infrarotdetektor besteht aus 12000 bis 300000 solcher Mikrobolometer bei einer „Pixelbreite“ von $23,5\mu\text{m}$. Diese Detektoren bestehen aus unterschiedlichen Materialien, wie zum Beispiel Indium-Gallium-Arsenid InGaAs, Indium-Antimon InSb oder Indium-Arsenid InAs [13, 24] oder Vanadium-Oxid, Mangan-, Cobalt- oder Nickeloxid [13]. Die abbildenden Optiken dazu bestehen meist aus Natrium-Chlorid, Cadmium-Tellur, Silizium oder Germanium [13, 24, 25, 26]. Der FLUKE TI20 Detektor aus Kapitel 3.1 ist aus Indium-Antimon, der NEC TH9100pro Detektor (Detektorbezeichnung HX0830) aus Kapitel 3.2 ist aus Vanadium-(Poly)-Oxid (VO_x) [27], ihre Optiken sind aus Germanium mit spezieller dielektrischer Beschichtung, welche entspiegelnd (antireflektierend) wirkt, so dass mehr Strahlung durch die Optik tritt. Nähere Informationen zu VO_x -Detektoren finden sich in Tabelle 6.3 von [13]. Näheres über die optischen Materialien ist in [25] zu finden. Diese Art der Detektoren bezeichnet man als Hochgeschwindigkeitsdetektoren (HSD) oder Focal Plain Arrays (FPA) [28].

Es gibt einige charakteristische Kenngrößen [Widerstand (Resistance (R), Temperature Coefficient of Resistance (TCR), Thermal Conductivity (G), Thermal Time Constant (τ), Heat Capacity (C), Voltage Responsivity (Rv), IR Absorptivity (η), Noise Detectivity (D^*)], die die Güte und Qualität eines Detektors bezeichnen, die hier nicht näher erläutert werden, die aber in [13, 28, 29] detailliert sind.

2.4 Indirekte Messmethode nach SBG

Bei der Herleitung dieser Methode sollte man darauf achten, dass hier zwei verschiedene Emissionsgradfaktoren zum Einsatz kommen, nämlich der von Aluminiums ϵ_{Alu} und der der Emissionsgradkorrektur, die in der Infrarotkamera einstellbar ist, ϵ_{Kam} .

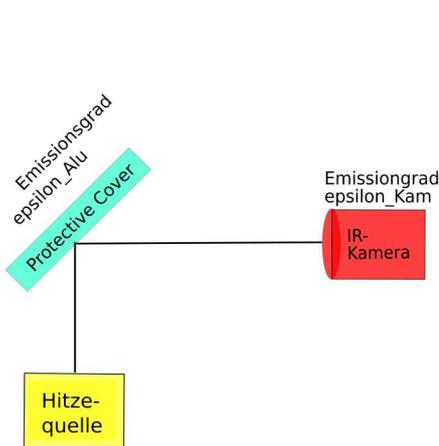


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der einfach indirekten Emissionsgradbestimmungsmethode.

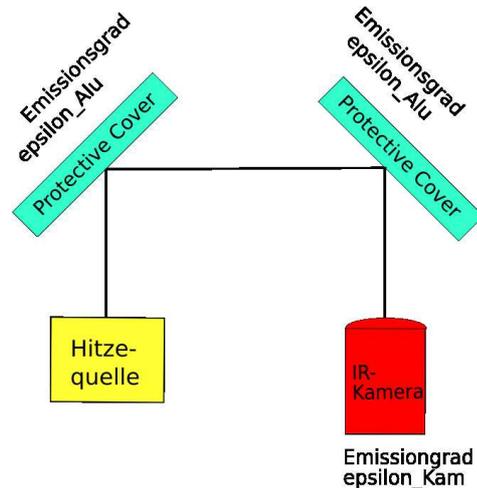


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der zweifach indirekten Emissionsgradbestimmungsmethode.

Die einfache Emissionsgradbestimmung, siehe hierzu Bild 2.7, nach SBG: Die Leistung substituiert durch p_{theo} , welche theoretisch abgestrahlt wird, ergibt sich aufgrund der Reflexion am Protective Cover zu:

$$p_{\text{theo}} = (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{O}}^4 + \epsilon_{\text{Alu}} \cdot (T_{\text{Um}})^4. \quad (2.13)$$

Wobei ϵ_{Alu} der Emissionsgrad vom Protective Cover, ϵ_{Kam} der einstellbare Emissionsgradwert der IR-Kamera, T_{O} die Temperatur der betrachteten Hitzequelle (Objekt) und T_{Um} die Umgebungstemperatur ist (die Temperatur, welche im Protective Cover reflektiert wird).

Die spezifische Leistung, p_{M} , welche in der IR-Kamera gemessen wird (Index M wie Messung), ergibt sich nach SBG zu:

$$p_{\text{M}} = \epsilon_{\text{Kam}} \cdot (T_{\text{M}})^4 + (1 - \epsilon_{\text{Kam}}) \cdot T_{\text{Um}}^4. \quad (2.14)$$

Wobei ϵ_{Kam} der einstellbare Emissionskorrekturfaktor der Kamera, T_{M} die von der IR-Kamera gemessene Temperatur der Hitzequelle ist.

Falls in der IR-Kamera ein Emissionsgrad $\epsilon_{\text{Kam}} = 1$ gewählt wird, vereinfacht sich die Formel zu: $p_{\text{M}} = T_{\text{M}}^4$. Da beide Formeln dieselbe spezifische Leistung liefern müssen, können sie gegenüber gestellt werden,

$$p_{\text{theo}} = p_{\text{M}} = T_{\text{M}}^4. \quad (2.15)$$

2 Theorie

Es ergibt sich somit:

$$T_M^4 = (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_O^4 + \epsilon_{\text{Alu}} \cdot T_{\text{Um}}^4. \quad (2.16)$$

Diese Formel nach den Emissionsgrad ϵ_{Alu} umgestellt, ergibt:

$$\epsilon_{\text{Alu}} = \frac{T_M^4 - T_O^4}{T_{\text{Um}}^4 - T_O^4}. \quad (2.17)$$

Die Fehlerrechnungen, die in dieser Arbeit durchgeführt werden beruhen auf der quadratisch-unabhängigen Fehlerrechnung nach der Formel:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Delta x_i^2} \quad (2.18)$$

[30, 31].

Hier ergibt sich als Fehlerformel für die Einfachreflexions-Emissionsgrad-Bestimmungsmethode:

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{\text{Alu}} = & \left[\left(\frac{4T_M^3}{T_{\text{Um}}^4 - T_O^4} \right)^2 \cdot (\Delta T_M)^2 + \left(\frac{-4T_O^3 \cdot (T_{\text{Um}}^4 - T_O^4) + 4T_O^3 \cdot (T_M^4 - T_O^4)}{(T_{\text{Um}}^4 - T_O^4)^2} \right)^2 \cdot (\Delta T_O)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{4T_{\text{Um}}^3 \cdot (T_O^4 - T_M^4)}{(T_{\text{Um}}^4 - T_O^4)^2} \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{Um}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Die Doppelreflexionsmethode benutzt denselben Gedankengang, nur noch um eine Ecke mehr gedacht. Wir betrachten die Abb. 2.8. Nachdem die Wärmestrahlung des Heizelementes vom ersten Protective Cover reflektiert wurde, ergibt sich, wie eben gezeigt, folgende spezifische Leistung

$$p = T_{M1}^4 = (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_O^4 + \epsilon_{\text{Alu}} \cdot T_{\text{Um}}^4. \quad (2.20)$$

Diese Leistung ist nun wieder die Ausgangsleistung T_{M1}^4 für die Reflexion am zweiten Protective Cover, und wird somit in dieselbe Formel eingesetzt:

$$T_{M2}^4 = (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{M1}^4 + \epsilon_{\text{Alu}} \cdot T_{\text{Um}}^4 = (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot [(1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_O^4 + \epsilon_{\text{Alu}} \cdot T_{\text{Um}}^4] + \epsilon_{\text{Alu}} \cdot T_{\text{Um}}^4. \quad (2.21)$$

Ausmultiplikation und Umstellen ergibt:

$$(\epsilon_{\text{Alu}} - 1)^2 = \epsilon_{\text{Alu}}^2 - 2\epsilon_{\text{Alu}} + 1 = \frac{T_{M2}^4 - T_O^4}{T_O^4 - T_{\text{Um}}^4} + 1. \quad (2.22)$$

Diese Gleichung gelöst, ergibt (nur diese Lösung ist zutreffend):

$$\epsilon_{\text{Alu}} = 1 - \sqrt{\frac{T_{M2}^4 - T_O^4}{T_O^4 - T_{\text{Um}}^4} + 1}. \quad (2.23)$$

Die Fehlerrechnung hierfür ergibt dann

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{\text{Alu}} = & \left(\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{T_{\text{M}}^4 - T_{\text{O}}^4}{T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4} + 1 \right)^{-1} \cdot \left[\left(\frac{4T_{\text{M}}^3}{T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4} \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{M}})^2 \right. \right. \\ & + \left(\frac{-4T_{\text{O}}^3 \cdot (T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4) - 4T_{\text{O}}^3 \cdot (T_{\text{M}}^4 - T_{\text{O}}^4)}{(T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4)^2} \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{O}})^2 \\ & \left. \left. + \left(\frac{4T_{\text{Um}}^3 \cdot (T_{\text{M}}^4 - T_{\text{O}}^4)}{(T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4)^2} \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{Um}})^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

2.5 Direkte Messmethode nach SBG

SBG nach Kapitel 2.2:

$$p = \varepsilon_{\text{Alu}} \cdot T_{\text{O}}^4 + (1 - \varepsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4 \quad (2.25)$$

Umstellung ergibt:

$$T_{\text{O}} = \left(\frac{T_{\text{M}}^4 - (1 - \varepsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4}{\varepsilon_{\text{Alu}}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.26)$$

Die spezifische Leistung p_{theo} , welche theoretisch abgestrahlt wird, ergibt sich zu:

$$p_{\text{theo}} = (\varepsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{O}}^4 + (1 - \varepsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4 \quad (2.27)$$

Die Variablen sind definiert wie im Kapitel 2.4.

Die spezifische Leistung p_{M} , welche in der IR-Kamera gemessen wird (Index M wie Messung), ergibt sich zu:

$$p_{\text{M}} = \varepsilon_{\text{Kam}} \cdot (T_{\text{M}})^4 + (1 - \varepsilon_{\text{Kam}}) \cdot T_{\text{Um}}^4 \quad (2.28)$$

Wobei ε_{Kam} der einstellbare Emissionskorrekturfaktor der Kamera, T_{M} die von der IR-Kamera gemessene Temperatur der Hitzequelle ist.

Mit $\varepsilon_{\text{Kam}} = 1$, vereinfacht sich die Formel zu:

$$p_{\text{M}} = T_{\text{M}}^4 \quad (2.29)$$

Da beide Formeln dieselbe spezifische Leistung liefern müssen, können sie gegenüber gestellt werden.

$$p_{\text{theo}} = p_{\text{M}} = T_{\text{M}}^4 \quad (2.30)$$

Es ergibt sich somit:

$$T_{\text{M}}^4 = (\varepsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{O}}^4 + (1 - \varepsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4 \quad (2.31)$$

2 Theorie

Diese Formel, nach dem Emissionsgrad ϵ_{Alu} umgestellt, ergibt:

$$\epsilon_{\text{Alu}} = \frac{T_{\text{M}}^4 - T_{\text{Um}}^4}{T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4}. \quad (2.32)$$

Die direkte Emissionsgradbestimmungsmethode ist fehlerunanfälliger als die indirekte Methode, da in ihr Fehlerkomponenten wie Streuung nicht Eingang finden.

Hier ergibt sich die quadratisch-unabhängige Fehlerrechnung zu:

$$\Delta\epsilon_{\text{Alu}} = \left[\left(\frac{4 \cdot T_{\text{M}}^3}{T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4} \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{M}})^2 + \left(\frac{(T_{\text{Um}}^4 - T_{\text{O}}^4) \cdot 4T_{\text{Um}}^3 + (T_{\text{M}}^4 - T_{\text{Um}}^4) \cdot 4T_{\text{Um}}^3}{(T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4)^2} \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{Um}})^2 + \left(\frac{(T_{\text{M}}^4 - T_{\text{Um}}^4) \cdot 4T_{\text{O}}^3}{(T_{\text{O}}^4 - T_{\text{Um}}^4)^2} \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{O}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

3 Die Infrarotkameras

„Die anderen Blumen sind immer schöner“

Japanische Weisheit



Abbildung 3.1: TI20 von FLUKE, 128 x 96 Pixel



Abbildung 3.2: TH9100pro von Nec, 320 x 240 Pixel

3.1 TI20 von Fluke

Da die Anschaffung einer Infrarotkamera von einer gewissen Grundkenntnis von den gegebenen Umständen und erforderlichen Funktionalitäten der Kamera abhängt, wurde zuerst eine Infrarotkamera vom Maier-Leibnitz-Laboratorium (MLL) ausgeliehen. Diese Infrarotkamera war das Modell TI20 von FLUKE [32]

Dieses Modell besitzt eine Auflösung von 128 auf 96 Pixel, einen Indium-Antimon Detektor, misst auf $0,1^{\circ}\text{C}$ genau und gibt eine Falschfarben-Temperaturbilddarstellung aus. Der Fehler wird mit 2% oder $\pm 2\text{K}$ angegeben bei einer relativen Temporauflösung von $0,1^{\circ}\text{C}$, die Reproduzierbarkeit mit 1% oder $\pm 1\text{K}$. Die Kamera an sich ist handlich und für grundlegende Temperaturaufnahmen gut geeignet. Mit der Kamera wird standardmäßig ein Auswerteprogramm, 'InsideIR' mitgeliefert. Es verfügt über die Möglichkeit sämtliche Einstellungen an der Kamera auch nachträglich (offline) am Computer zu verändern, hier sei vor allem auf die Emissionsgradeinstellung

3 Die Infrarotkameras

ϵ_{Kam} von 1,0 bis 0,1 in 0,01er Schritten, sowie die Hintergrundtemperaturkompensation RTC (Reflection Temperature Correction), welche manuell eingestellt oder aber auch ausgeschaltet werden kann, hingewiesen. Weiterführende Informationen finden sich in Abb. 3.3 und im Internet ([32]).

3.2 TH9100pro

Die IR-Kamera TH9100pro der Firma NEC wurde schließlich aufgrund der Erfahrung mit der TI20 und den im Folgenden dargelegten Eigenschaften gekauft. Sie ist transportabel, aber auch im Festbetrieb einsetzbar. Sie ist direkt (stand alone) bedienbar, aber ebenso komplett durch das Programm IRMotion-Premium am Windows-Rechner via Firewire-Schnittstelle fernsteuerbar (remote-control). Sie verfügt über eine hohe Temporauflösung von 0,06°C im Bereich von 0 bis 100°C des 320 x 240 Pixel Vanadium-Poly-Oxid Detektors und gibt eine Falschfarben-Temperaturbilddarstellung aus. Der systematische Fehler wird mit 2% oder $\pm 2\text{K}$ angegeben. Sie verfügt über eine automatisierte Hintergrundtemperaturermittlung und die Möglichkeit ϵ_{Kam} von 1,0 bis 0,1 in 0,01er Schritten einzustellen. Darüberhinaus verfügt sie über eine vorgegebene Datentabelle für Emissionsgrade verschiedener Materialien, so dass auch hierüber eine Emissionsgradeinstellung erfolgen kann. Weiterführende technische Informationen gibt es in der Abb. 3.2. und auf der Herstellerseite im Internet ([33]).

Fluke Ti20 Wärmebildkamera

Spezifikationen	
Thermische Daten	Temperaturbereich: -10 bis 350 °C Sensortyp: 128 x 96 Thermoelement-Bolometermatrix mit ungekühltem Mikrobolometer Ungenauigkeit: ±2 % oder ±2 °C (der größere Wert gilt) Ungenauigkeit (von -10 bis 0 °C): ±3 °C Reproduzierbarkeit: ±1 % oder ±1 °C (der größere Wert gilt) Temperaturauflösung (NETD): 200 mK Temperaturanzeigauflösung: 0,1 °C
Optik (Infrarot)	Spektralbereich: 7,5-14 micron Visierhilfe: Einfacher Laserpunkt (gemäß IEC Klasse 2 und FDA Klasse II) Optische Auflösung: 75:1 Minimaler Messfleckdurchmesser: 8,1 mm bei 61 cm Bildfrequenz: 9 Hz Gesichtsfeld (FOV): 20° horizontal x 15° vertikal Momentansichtfeld (IFOV): 2,8 mrad
Einstellungen	Scharfstellung: Fokussierbar, 15 cm bis unendlich Temperaturskala: °C wählbar Farbpaletten: Grau, Grau/Blau/Rot invertiert, Eisen, Regenbogen, Heißes Metall, Hoher Kontrast, Blau/Rot, Rot, Bernstein Messbetriebsarten: Automatisch oder manuell wählbar Laser Ein/Aus: enthalten Verstärkungsregelung: enthalten Pegelregelung: enthalten Displayhintergrundbeleuchtung: Hell oder dunkel wählbar
Allgemeine Betriebsdaten	Einstellbarer Emissionsfaktor: 0,10 bis 1,00 mal 0,01 LCD-Display: TFT-Technologie: optimiert für den Einsatz in Innenräumen und im Freien, 70,5 mm x 53,5 mm Hintergrundstrahlung: -50 bis 460 °C Betriebstemperatur: -10 bis 50 °C Relative Feuchte: 10 bis 90 % ohne Kondensation Lagertemperatur: -25 bis 70 °C [ohne Akkus] Speicherkapazität: 100 Bilder Laseranzeige: enthalten Batterieanzeige: enthalten Messmodusanzeige: enthalten Systemsoftware: InsideIR (im Lieferumfang) PC-Betriebssysteme: Microsoft® Windows 2000® oder Windows XP®

Abbildung 3.3: Technische Daten der FLUKE Ti20 nach [32]

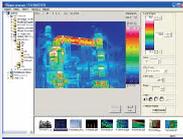
3 Die Infrarotkameras

Specifications			
Measuring range	TH9100PMV	TH9100PWW	
	Range 1	-20 to 100°C	-40 to 120°C
	Range 2	0 to 250°C	0 to 500°C
	Range 3 (option)	100 to 800°C	200 to 2000°C
Resolution	Range 1	0.06°C (at 30°C 60Hz) 0.02°C (at 30°C Σ 64)	0.08°C (at 30°C 60Hz) 0.03°C (at 30°C Σ 64)
Accuracy	$\pm 2^\circ\text{C}$ or $\pm 2\%$ of reading whichever greater		
Detector	Uncooled focal plane array (microbolometer)		
Spectral range	8 to 14 μm		
I.F.O.V.	1.2mrad		
Focusing range	30cm to infinity		
Field of view	21.7°(H) x 16.4°(V)		
Frame time	60 frames/sec		
Display	View finder and 3.5 inch LCD monitor with auto switch		
Thermal image pixels	320 (H) x 240 (V) pixels		
A/D resolution	14 bits		
Measuring functions	Run/Freeze		
S/N improvement	$\Sigma 2, \Sigma 8, \Sigma 16, \Sigma 32, \Sigma 64$ and spatial filter ON/OFF		
Alarm	Screen display and alarm sound (ON/OFF)		
Interval measurement	Recording on built in real time memory : 1/60 to 3600 sec interval Recording on memory card : 5 to 3600 sec interval (thermal image) 30 to 3600 sec. (thermal & visual image) Trigger function provided		
Emissivity correction	0.10 to 1.00 (at 0.01 step), Emissivity table provided		
Env. temp. correction	Provided (including interval NUO)		
User setup	Pre-registration of environmental setup (max. 10 setups)		
Background comp.	Provided		
Auto functions	Full automatic (level, sense, focus) Level trace, auto-gain control		
Display functions	Thermal/visual composite image display Display color : color/monochrome, positive/negative Gradation : 16, 32, 64, 128, 256 Color palette : rainbow, brightness, shine, hot-iron, medical, fine Isothermal band display : max. 4 bands Thumbnail display : 12 thermal images replay Multi-sense display, Battery life indicator Line-profile : X, Y line profile (waveform display) Multilingual menu		
Image processing functions	Variable level/sense Multi-point temperature display (10pts) Multi-point emissivity display (10pts) ΔT display Max/Min (peak hold) temperature display Alarm (full screen or specified box) Digital zoom : 2, 4 times (Run/Freeze) Box setting (max. 5 boxes)		
Annotation	Text and voice annotation (30 sec per image)		
Storage device	Compact flash memory card for Thermal image in SIT or BMP file format Visual image in SIT or JPEG file format Thermal/visual composite image in BMP file format		
Movie recording	Real-time memory : 1664 images (max. 60Hz)		
Video signal output	NTSC/PAL composite video signal, S-video		
Interface	IEEE1394, RS-232C		
Operating temp./humidity	-15 to 50°C, 90% RH or less (not condensed)		
Storage temp./humidity	-40 to 70°C, 90% RH or less (not condensed)		
Power supply	AC adaptor : 100V to 240V, DC 7.2V (nominal)		
Power consumption	Approx. 6W (typ)		
Shock and vibration	294m/sec ² (IEC60068-2-27), 29.4m/sec ² (IEC60068-2-6)		
Environmental protection	IP54 (IEC60529)		
Dimensions	Approx. 108 (W) x 113 (H) x 189 (D) mm (excluding projection)		
Weight	Approx. 1.4kg (excluding LCD & battery) Approx. 1.7kg (including LCD & battery)		
Standard accessories	AC adaptor, battery pack (2pcs), battery charger, compact flash memory card, grip belt, neck strap, lens cap, carrying case, viewer software, operation manual		

Specifications are subject to change without prior notice.

Visual Camera	
Pixels	0.41Mega pixels
Effective image pixels	752 (H) x 480 (V) pixels
Field of view	30.1° (H) x 22.7° (V)
Sensitivity	1 lux
Focusing distance	30cm to infinity
Auto exposure	Provided
Video signal	NTSC/PAL

Viewer Software

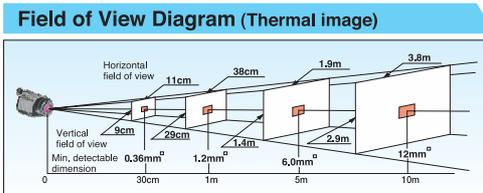


- Thermal image display :
 - Thermal image thumbnail (Windows Explorer)
 - Thermal image replay
 - Image preview
- Setup & Functions :
 - Level, Sense, Span, Voice replay,
 - Selection of thermal or visual image,
 - Color bars, Gradation, Page
- Edit :
 - Image save (BMP or JPEG)
 - Select folder

Options

TH91-390	High temperature range for TH9100PMV *1 R3: 100 to 800°C, R4: 200 to 2000°C
TH91-392	High temperature range for TH9100PWW *1 R3: 200 to 2000°C
TH91-313	USB Interface with TH91-737 remote program *1
TH91-382	Telephoto lens (x2) 10.9°(H) x 8.2°(V) with visual camera
TH91-383	Wide angle lens 42.0°(H) x 32.1°(V) with visual camera
TH91-386	Close-up lens, 95 μm , 30mm(H) x 22mm(V) W.D. 75mm
TH91-385	Close-up lens, 37 μm , 11mm(H) x 8mm(V) W.D. 13mm
TH91-387	External lens adaptor for TH71-344A wide angle lens, TH71-377/378 close up lenses
TH71-464	Rechargeable battery pack (Li-ion) 7.2V 1800mAh
TH71-340	Battery charger for 100/110V (2 battery slots)
TH71-339	Battery charger for 220/240V (2 battery slots)
TH71-334	AC adaptor (100/110V AC)
TH71-360	AC adaptor (110V AC) UL
TH71-359	AC adaptor (220/240V AC) CE
TH91-375	Remote controller
TH91-398-L05	5m cable for remote controller TH91-375
TH71-347	LCD remote controller (TH91-347-L connecting cable is required)
TH91-347-L05	5m cable for LCD remote controller TH71-347
TH91-347-L10	10m cable for LCD remote controller TH71-347
TH91-347-L15	15m cable for LCD remote controller TH71-347
TH91-347-L20	20m cable for LCD remote controller TH71-347
TH91-349	RS232C Cable
TH91-348	S-video cable
TH91-713	Report Generator Software *2
TH91-711	Image Processor Software (TH91-713 is required) *2
TH91-712	Image Processor Pro Software *2
TH71-717	IEEE1394 Data Capture Software *2
MikroSpec	Thermal Imaging Software *2
MikroSpec R/T	Real-Time Thermal Data Acquisition & Analysis Software *2
irMotion	Recorder, Trigger and Measurement Software *2
Trigger Box	Trigger box for irMotion

*1 Specify these options when ordering the main unit (TH9100PMV/PWW)
*2 Compatible with the Microsoft Windows 2000 professional, Windows XP



CAUTION FOR SAFETY

Please read "WARNING" & "CAUTION" in the operation manual attached to the product carefully for proper operation before using the product.

NEC San-ei Instruments, Ltd.

1-25-12, Akebono-cho, Tachikawa-shi,
Tokyo 190-8537, Japan
Phone: +81-42-522-0529
Fax : +81-42-522-0538
E-mail: osd@necsan-ei.co.jp
Web : http://www.necsan-ei.co.jp/osd/

Distributor:

NEC

Catalog ref : 048

10605B3 Printed in Japan

Abbildung 3.4: Daten der NEC TH9100pro [33]

4 Arbeitsweise des IR-Kamera Betriebssystems und der zugehörigen Computerauswerte-Software

„Für seine Arbeit muss man Zustimmung suchen, aber niemals Beifall.“
Charles-Louis Baron de Montesquieu

Zunächst ist die Arbeitsweise der Infrarotkameras als auch die der mitgelieferten Computersoftware unbekannt. Wenn man mehr über deren Vorgehensweise und ihre Verlässlichkeit erfahren möchte, so bleibt einem die Möglichkeit, durch geeignete Versuche die benutzten Formeln zu entziffern. Sämtliche Infrarotaufnahmen, die in dieser Diplomarbeit zu finden sind, wurden bei einer Emissionsgradeinstellung von $\epsilon_{\text{Kam}} = 1$ getätigt. Bei den Daten wird explizit erwähnt, bei welchen Einstellungen sie getätigt wurden.

Zuerst wurde anhand einer Hitzequelle, $321\text{ K} \pm 1\text{ K}$ ($48 \pm 1^\circ\text{C}$) heiß, eine Abstandsmessung in 10cm-Schritten von 60-150cm und bei 222cm durchgeführt, siehe Tabelle 4.1. Dies dient dazu, einen Überblick über die Stabilität und Verlässlichkeit der Messungen der Kameras zu erhalten. Es wird erwartet, dass sich die IR-Kameras nach den in Kapitel 2.3 dargelegten theoretischen Überlegungen verhält. Deshalb sollte eine Messung der Leistung abstandsunabhängig sein. Außerdem lässt sich so die Standardabweichung der Messwerte bestimmen und somit ein Maß für die relative Genauigkeit definieren. Die von der IR-Kamera gelieferten Werte wurden zusätzlich mit dem Kontaktthermometer bestimmt.

Desweiteren wurde im Abstand von 1,40m für Variation des Emissionsgrades ϵ in 0,1er Schritten mit Umgebungstemperaturkorrektur für $T_{\text{UM}} = 21^\circ\text{C}$ (Reflexion Background Correction, RTC) RTC = 21 und ohne Umgebungstemperaturkorrekter, RTC = OFF jeweils eine Messung durchgeführt. Die zu den jeweiligen ϵ und RTCs mit der IR-Kamera gemessenen Temperaturen wurden in Tabellen zusammengefasst, der jeweils zugehörige Wert des Kontaktthermometers hinzugefügt. Hinzugefügt wurden die Ergebnisse, die die Auswertesoftware am Computer lieferte. Auf diese Art und Weise wurde die Arbeitsweise der Software sowohl auf den Kameras, als auch der mitgelieferten Rechnerapplikation bestimmt.

Die Hintergrundkompensation RTC der Kameras ist verschieden einstellbar. Bei der FLUKE-IR-Kamera ist sie auch abschaltbar. Dennoch lässt sich durch die ermittelten Werte bei RTC = OFF auf die Arbeitsweise der Kamerasoftware Rückschlüsse ziehen, da die Kamera sich dann selber einen RTC-Wert wählen muss. Die Hintergrundkompensation bei der NEC-Kamera kann nur nach der Messung verstellt werden.

4.1 Abstandsmessung und Standardabweichung

Tabelle 4.1: Vergleichsmessung und -Auswertung der Infrarotkameransoftware (FLUKE TI20) und ihres Computerpendants (SW wie Software) gegenüber dem Kontaktthermometer.

Abstand	$T_{M_{IRKam}}$ IR-Kam TI20	$T_{M_{IRSW}}$ SW InsideIR	Ktkththermo
[cm]	[°C]	[°C]	[°C]
62	48,1	48,0	47,6
70	48,2	48,2	47,8
80	48,2	48,2	47,2
90	48,0	48,1	46,8
100	48,1	48,1	46,0
110	47,8	48,1	47,6
120	47,8	47,9	47,3
130	47,9	47,9	46,7
140	48,1	48,1	46,0
150	48,1	48,1	46,6
222	48,1	48,1	47,2
Mittelwert	48,1	48,0	47,0
Standardabw.	0,1	0,14	0,62

Wie in Tabelle 4.1 erkennbar ist, ergeben Kamera-Software und Computersoftware dieselben Messergebnisse. Geringe Abweichungen ergeben sich durch die unterschiedlich betrachteten Flächen und Punkte in der Auswertung. Die TI20 ermittelt einen Durchschnittswert aus den Temperaturen für eine Kreisfläche, die konzentrisch um den aufgenommenen Mittelpunkt liegt und 5 Prozent der Gesamtfläche des Detektors einnimmt. Die genommenen Softwaredaten entsprechen der Temperatur dieses Mittelpunktes. Dieser wird in der Software als Kennwert zum betrachten Bild ausgegeben.

Dieselbe Messung wurde auch mit der TH9100pro durchgeführt und hier in Tabelle 4.2 zu sehen, ist die Übereinstimmung zu erkennen. Und ebenfalls ist hier die Abweichung den ungenau definierten Auslesepunkten zuzuschreiben. Die TH9100pro bietet die Gelegenheit während der Aufnahme bestimmte Punkte oder Rechtecke per Sicht zu bestimmen und auslesen zu können. Dies wurde getan, ebenso bei der Software. Ungenauigkeiten in der Bestimmbarkeit der genauen Punkte lassen sich aber durch die Bewegung der Kamera von der Hitzequelle weg nicht vermeiden. (Systematischer Fehler, den der Messvorgang mit sich bringt. Trifft deshalb genauso auf die vorangegangene FLUKE-Messung zu.) Interessant ist hier folgender Punkt. Die Standardabweichung der NEC-Kamera beträgt bei dieser Messung 0,2 Kelvin. Die Spezifikationen geben eine Abweichung von 0,08 Kelvin an. Entweder ergeben die systematischen Fehler einen Wert von ca. 0,12 K zuviel für unsere Messung, oder die IR-Kamera erreicht den angegebenen Wert nicht immer oder nur unter sehr speziellen Bedingungen. Bei der Kalibrierungsmessung (siehe Kapitel 6.1 und Abb. 6.3) der Thermometer erreichte sie diese Spezifikation.

Da das Kontaktthermometer im zweiten Teil der Messung ab 130cm eine systematische Abweichung nach oben aufweist, ohne dass die Temperatur der Quelle verändert wurde, und alle anderen

4.2 Emissionsgradvariationsmessung

Tabelle 4.2: Vergleichsmessung und -Auswertung der Infrarotkameransoftware (NEC TH9100pro) und ihres Computerequivalents (SW wie Software) und den Werten des Kontaktthermometers.

Abstand [cm]	$T_{M_{IRKam}}$ TH9100pro [°C]	$T_{M_{IRSW}}$ SW irMotion [°C]	Kontaktthermo. [°C]	
30	46,7	46,5	46,7	
40	46,3	46,5	46,7	T_{Um}
50	46,2	46,4	46,5	19,4
60	46,5	46,3	46,6	
70	46,4	46,4	46,7	
80	46,4	46,3	46,5	
90	46,2	46,2	46,8	
100	45,9	46,1	46,4	
110	46,2	46,2	46,6	
120	46,4	46,2	46,5	
MW 30-120:			46,60	Ktk. korr.
130	46,2	46,2	47,4	46,7
140	46,2	46,2	47,4	46,7
150	46,5	46,6	47,3	46,6
160	46,3	46,3	47,2	46,5
222	46,0	46,1	47,2	46,5
MW:	46,29	46,3	47,30	46,60
Stdabw.	0,20	0,15	0,12	0,10

Thermometer konstante Werte anzeigten, wurden die Kontaktthermometer-Temperaturwerte um die Differenz der Mittelwerte des ersten Teils und des zweiten Teils (0,7 K) nach unten korrigiert.

4.2 Emissionsgradvariationsmessung

Es wurde im Abstand von 1,40m, mit Variation von ϵ in 0,1er Schritten mit $RTC = 21(^{\circ}C)$ eine Messung mit der FLUKE TI20 durchgeführt. Die zu den jeweiligen ϵ und RTC mit der IR-Kamera gemessenen Temperaturen wurden mitsamt der zugehörigen Kontakttemperaturwerte in der Tabelle 4.3 zusammengefasst. Hinzugefügt wurden die Ergebnisse, die die Auswertesoftware am Computer lieferte. Ziel war es zu verifizieren, dass Kamera und die Software mit denselben Methoden, nämlich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz arbeiten. Es wurden ebenfalls die in den Tabellen aufgeführten Werte rechnerisch mit den in Kapitel 2.5 dargestellten Formeln ($p = \epsilon_{Alu} \cdot T_M^4 + (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot T_{Um}^4$, mit $p = 320,56^4 K$) bestimmt. Diese Werte wurden in Spalte 3 der Tabellen 4.3 und 4.4 eingetragen und mit den Ergebnissen der Kameramessung und der offline Softwareanalyse verglichen.

Die Daten in Tabelle 4.3 belegen, dass die Kamera nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz arbeitet.

4 Arbeitsweise der IR-Kamera Betriebs- und Computerauswertesoftware

Tabelle 4.3: Temperaturwerte der IR-Kamera, deren Computerauswertesoftware, der berechneten Werte nach SBG und des Kontaktthermometers im Vergleich. Sinn war es die Arbeitsweise nach SBG zu zeigen.

	ϵ_{Kam}	$T_{\text{berechnet}}$ [K], RTC=21	$T_{\text{berechnet}}$ [°C], RTC=21	$T_{\text{IR-Kam}}$ RTC=21	$T_{\text{IR-SW}}$ RTC=21
	0,99	320,8	47,6	47,7	47,8
$T_{\text{Pumpe, gem.}}$	0,9	323,1	50,0	50,4	50,3
bei $\epsilon_{\text{Kam}} = 1$	0,8	326,2	53,1	53,7	53,7
47,4°C	0,7	330,1	57,0	57,6	57,6
320,56 K	0,6	335,1	61,9	62,9	62,9
	0,5	341,7	68,5	69,9	69,9
T_{Um}	0,4	350,9	77,8	79,3	79,4
294,16 K	0,3	364,9	91,7	94,3	94,2
	0,2	388,8	115,6	120,9	120,9
	0,1	442,1	169,0	185,8	185,8

Geringe Temperaturabweichungen der Messdaten zu den durch die Stefan-Boltzmann-Formel erhaltenen Daten, vor allem in niedrigen Emissionsgradbereichen, scheinen technisch bedingt innerhalb der IR-Kameras zu sein, da dieselbe Messung, in Tabelle 4.4 zu sehen, im Abstand von $r = 0,55$ m mit der NEC TH9100pro durchgeführt, zu ganz ähnlichen Ergebnissen gelangt. Welcher Faktor dahintersteckt wurde nicht weiter untersucht.¹

Tabelle 4.4: NEC TH9100pro-Messung. (Temperaturwerte der IR-Kamera, deren Computerauswertesoftware, der berechneten Werte nach SBG und des Kontaktthermometers im Vergleich. Sinn war die Arbeitsweise nach SBG zu zeigen.)

	ϵ_{Kam}	$T_{\text{berechnet}}$ [K], RTC=21	$T_{\text{berechnet}}$ [°C], RTC=21	$T_{\text{IR-Kam}}$ RTC=21	$T_{\text{IR-SW}}$ RTC=21
	0,99	320,2	47,0	46,8	47,0
	0,9	322,5	49,4	49,6	49,5
	0,8	325,6	52,5	52,9	52,7
$T_{\text{Pumpe, gem.}}$	0,7	329,5	56,3	56,9	56,6
bei $\epsilon_{\text{Kam}} = 1$	0,6	334,4	61,3	62	61,6
46,8°C	0,5	341,0	67,9	69	68,3
317,0 K	0,4	350,2	77,1	77,8	77,8
	0,3	364,1	91,0	91,9	92,2
T_{Um}	0,2	388,0	114,8	120,4	117,7
293,7 K	0,1	441,2	168,0	182,3	182,1

¹Zu vermuten wäre auch ein empirischer Korrekturfaktor, der vom Hersteller zur Berücksichtigung von Luftfeuchtigkeit oder Sichtverhältnisse hinzugefügt wird. Diese Einstellung ist aber bei der NEC-Kamera manuell einstellbar und wurde für diese und alle weiteren Messungen deaktiviert.

4.3 Hintergrundkorrektur

Nun war es ebenfalls ein Anliegen herauszufinden, ob die Hintergrundkorrektur RTC der IR-Kameras ebenfalls nach Stefan-Boltzmann ermittelt wird.

Mit $p_{\text{on}} = \epsilon_{\text{Kam}} \cdot T_{\text{on}}^4 + (1 - \epsilon_{\text{Kam}}) \cdot T_{\text{um}}^4$

und $p_{\text{off}} = \epsilon_{\text{Kam}} \cdot T_{\text{off}}^4 + (1 - \epsilon_{\text{Kam}}) \cdot T_X^4$

folgt aus $p_{\text{off}} = p_{\text{on}}$

$$T_X = \left(\frac{\epsilon_{\text{Kam}} \cdot (T_{\text{on}}^4 - T_{\text{off}}^4) + (1 - \epsilon_{\text{Kam}}) \cdot T_{\text{um}}^4}{1 - \epsilon_{\text{Kam}}} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (4.1)$$

Diese berechneten Temperaturwerte wurden in Tabelle 4.3 dargestellt. In diesem Fall hilft uns die Software der TI20-Kamera weiter, sie gibt die verwendete Temperatur T_X aus, allerdings ohne Nachkommastellen. Die Umgebungstemperatur T_{Um} lag bei dieser Messung bei 21°C.

Tabelle 4.5: Tabelle zur Bestimmung von T_X der TI20 IR-SW.

ϵ	T_{on}	T_{off}	T_{XKamera}	$T_{\text{Xberechnet}}$
0,99	47,7	47,9	23	-9,01
0,9	50,4	50,2	23	23,4
0,8	53,7	53,1	24	24,2
0,7	57,6	56,9	24	23,3
0,6	62,9	61,4	24	24,3
0,5	69,9	67,7	24	24,4
0,4	79,3	76,7	25	23,9
0,3	94,3	90,6	25	24,0
0,2	120,9	113,8	25	25,1
0,1	185,8	172,7	26	26,2

Da natürlich ein gewisser zeitlicher Abstand zwischen den T_{on} und T_{off} -Messungen besteht, sind Variationen in der Hitzequelle, die zu einem leicht geänderten T_X -Wert führen, nicht ausgeschlossen. Dennoch bestätigen die gemessenen Werte die berechneten. Dass der erste Wert bei 0,99 einen abweichenden Wert ergibt, liegt hier am Messfehler der IR-Kamera (die Reproduzierbarkeit der Werte liegt bei 1°C).

Diesselbe Messung wurde auch für die NEC-Kamera durchgeführt. Bei dieser Kamera ist es eigentlich nicht vorgesehen, den Hintergrundwert zu ändern. Deshalb sollte der von ihr gewählte Wert möglichst nah an dem tatsächlichen Wert liegen. Bei dieser Messung war der von der Kamera gewählte Wert 21,9°C, während die tatsächliche Umgebungstemperatur 20,5°C betrug. Der Unterschied in den sich ergebenden Temperaturwerten sind in den Temperaturspalten ersichtlich, siehe Tabelle 4.6.

4 Arbeitsweise der IR-Kamera Betriebs- und Computerauswertesoftware

Tabelle 4.6: Tabelle zur Bestimmung von T_X der TH9100pro IR-SW.

ϵ	T_{on}	T_{off}	T_{XBENUTZT} in °C	T_{XderSW} berechnet
1	47,0	47,0	21,9	
0,9	49,5	49,4	21,9	21,7
0,8	52,7	52,4	21,9	22,1
0,7	56,6	56,2	21,9	21,8
0,6	61,6	61,0	21,9	21,8
0,5	68,3	67,4	21,9	21,9
0,4	77,8	76,5	21,9	22,0
0,3	92,2	90,4	21,9	22,0
0,2	117,7	117,9	21,9	20,4
0,1	182,1	181,8	21,9	20,6

5 Die Infrarotkamera im Magnetfeld

„Es ist ein großer Vorteil im Leben, die Fehler, aus denen man lernen kann, möglichst früh zu begehen.“

Winston Spencer Churchill

5.1 Die Infrarotkamera TI20 im Magnetfeld

Da im ATLAS-Myon Spektrometer während des Betriebes statische Magnetfelder herrschen werden, die bis zu einem halben Tesla Stärke erreichen können, wäre es von Vorteil, wenn man Aussagen über die Magnetfeld-Verträglichkeit von Wärmebildkameras treffen könnte. Welche Feldstärke hält eine IR-Kamera aus, und welches sind die Teile, die am ehesten davon betroffen sein können. Nach zahlreichen Telefonaten mit verschiedenen Herstellern von IR-Kameras konnte zwar keine Zusicherung gegeben werden, dass der Detektor einer Infrarotkamera oder deren elektronische Komponenten solch eine hohe magnetische Belastung überstehen können, dennoch konnte aus Aussagen über bisher bekannte Einsatzgebiete in Kernkraftwerken, oder nahe Starkstromleitungen darauf geschlossen werden, dass die Kamera einen Versuch bezüglich der Feldstärke überstehen kann. Es wurde auch weiterhin davon berichtet, dass es vor einem Ausfall durch induzierte Ströme zu Streifen im Bild kommen würde. [35, 36, 37, 38]

Daher wurde das Risiko für ausreichend gering befunden und folgendes Experiment durchgeführt. Die FLUKE TI20-Infrarotkamera wurde im eingeschalteten Zustand an einen Magneten mit geeigneter Feldstärke herangeführt und ihr Verhalten beobachtet.

Zuallererst wurde mit einem Magnetfeldmessgerät ermittelt, wie viel Tesla an geeigneten Stellen des großen Magneten (Bild 5.1) am Beschleuniger-Labor (BL) des Maier-Leibnitz-Laboratoriums (MLL) herrscht. Nachdem Bereiche zu 0,05, 0,1, 0,4 und 0,5 Tesla ausfindig gemacht worden waren, wurde die IR-Kamera vorsichtig und im eingeschalteten Zustand an den Magneten herangebracht.

Bei 0,05 Tesla funktionierte die IR-Kamera noch einwandfrei, wie in Bild 5.3 zu sehen. Bei 0,1 Tesla, siehe Bild 5.4, wurde durch das Magnetfeld der interne Shutter der Kamera gestört, sodass entweder nur noch eine Sicht auf den geschlossenen Shutter möglich war, was auf diese Art und Weise eine dauerhafte interne Temperaturmessung der Kamera ergibt, oder die Kalibration der Kamera wurde gestört, da der Shutter nicht geschlossen wurde.

Daher wurden die folgenden Versuche zwischen den Kalibrierungen und mit Ausrichtung der Kamera im Magnetfeld durchgeführt, so dass der Shutter offenstand. Bei ca. 0,35 Tesla gab es erste Anzeichen, dass sich Balken im Bild bildeten, bei 0,4 Tesla waren diese so stark ausgeprägt, dass der Versuch bei dieser Magnetfeldstärke beendet wurde, siehe Bilder 5.5 und 5.6.

5 Die Infrarotkamera im Magnetfeld



Abbildung 5.1: Der Magnet des Maier Leibnitz Laboratoriums (MLL).



Abbildung 5.2: Der prinzipielle Versuchsaufbau am Magneten des MLL.

5.1 Die Infrarotkamera TI20 im Magnetfeld

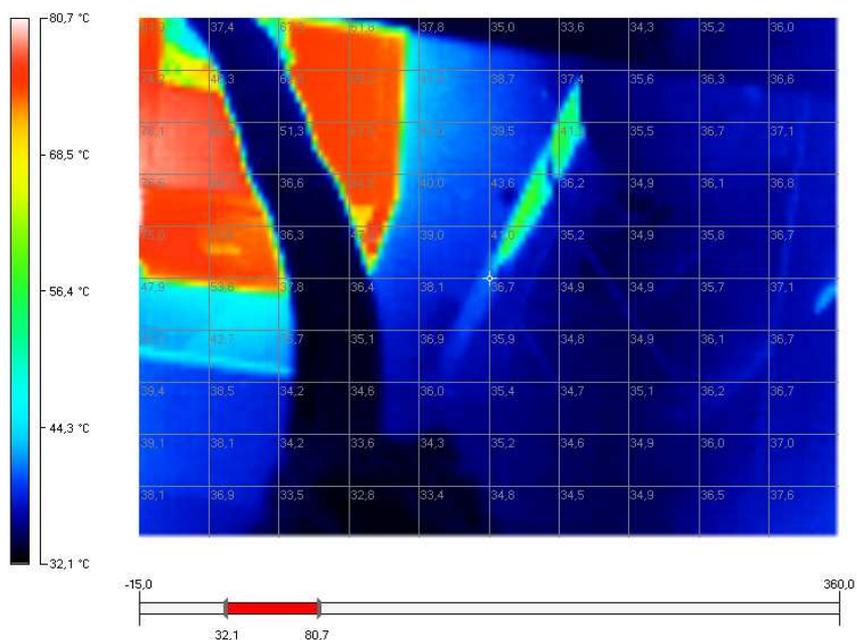


Abbildung 5.3: Bei ca. 0,05 Tesla, funktioniert die Kamera noch einwandfrei.

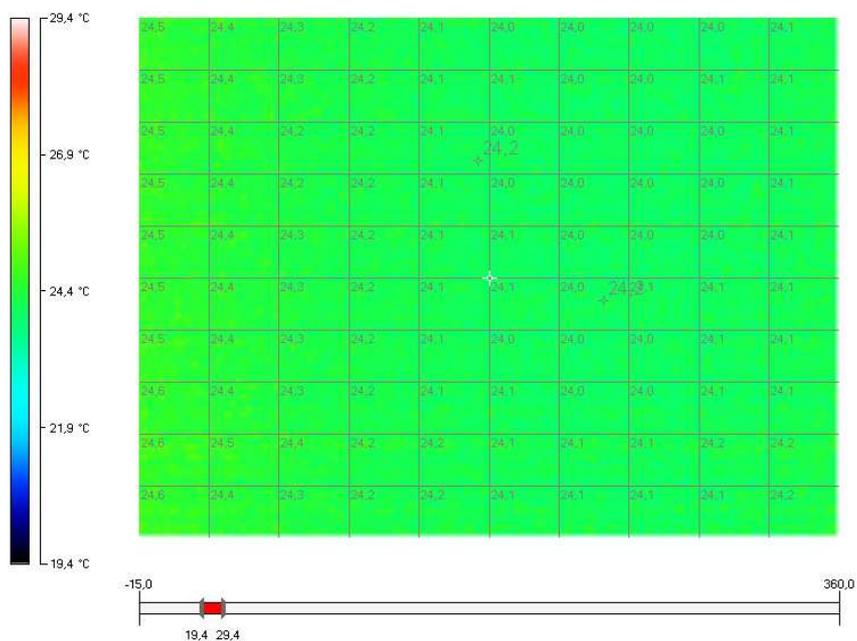


Abbildung 5.4: Aufnahme des durch das Magnetfeld geschlossenen Shutters durch die IR-Kamera bei ca. 0,1 Tesla

5 Die Infrarotkamera im Magnetfeld

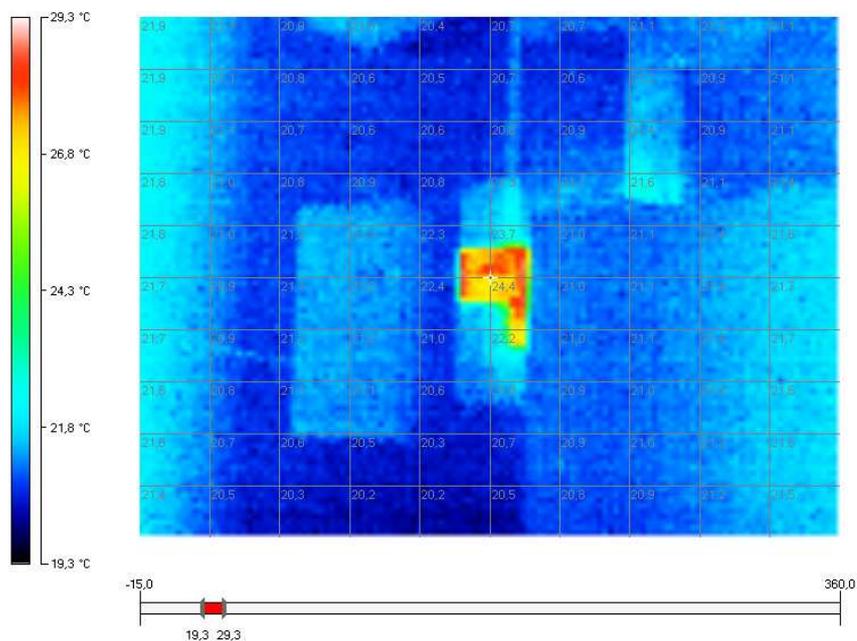


Abbildung 5.5: Leichte vertikale Balkenbildung an den Seitenrändern bei ca. 0,35 Telsa

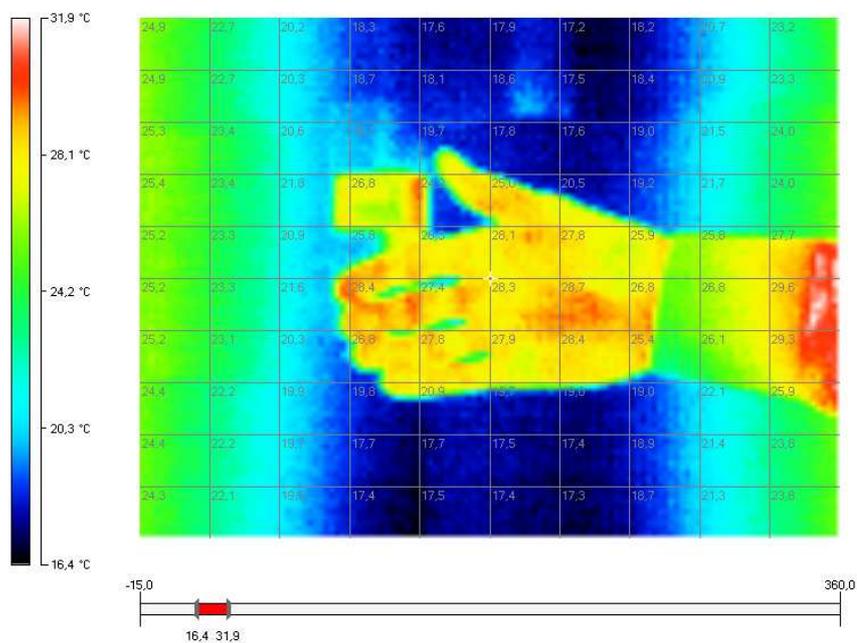


Abbildung 5.6: Deutliche vertikale Balkenbildung (grüne Bereiche) an den Seitenrändern bei ca. 0,4 Telsa

5.1 Die Infrarotkamera TI20 im Magnetfeld

Es ergaben sich aber nicht nur vertikale Streifen im Bild, was der dominanteste Effekt war, sondern auch ein Nachglimmeffekt. Wenn ein Foto aufgenommen worden war, konnte man die Position der betrachteten Fläche (Hand) noch sehen. Dieser Effekt verschwindet aber durch Neustart der Kamera oder durch Entfernen der Kamera aus dem Magnetfeld. Auch scheint es zu einem Langzeit-Einprägungseffekt gekommen zu sein. Wenn man bei der TI20-Kamera später Messungen durchgeführt hat, so konnte man durchaus Balken im Bild beobachten, die den hier verursachten entsprachen. Diese traten aber nicht sofort, sondern erst einige Zeit nach einer Neukalibrierung auf. Siehe hierzu Bilder 5.7 und 5.8

Aus dem Experiment heraus können wir schließen, dass ein Betrieb einer Infrarotkamera im ATLAS-Magnetfeld gelingt. Da bei ATLAS von einem gewissen Abstand aus gemessen wird, bei dem das Magnetfeld schwächer ausfällt, sind auch nicht so starke Effekte auf die Detektoren zu erwarten. Zusätzlich kann man magnetfeldabschirmende Materialien (μ -Metall) geeignet um die Kamera anbringen, die verhindern, dass der Shuttermechanismus gestört wird.

Inwiefern die Bestandteile einer Infrarotkamera strahlenhart sind, wurde nicht in einem Experiment überprüft, denn dazu konnten keine Informationen von den Herstellern in Erfahrung gebracht werden.

5 Die Infrarotkamera im Magnetfeld

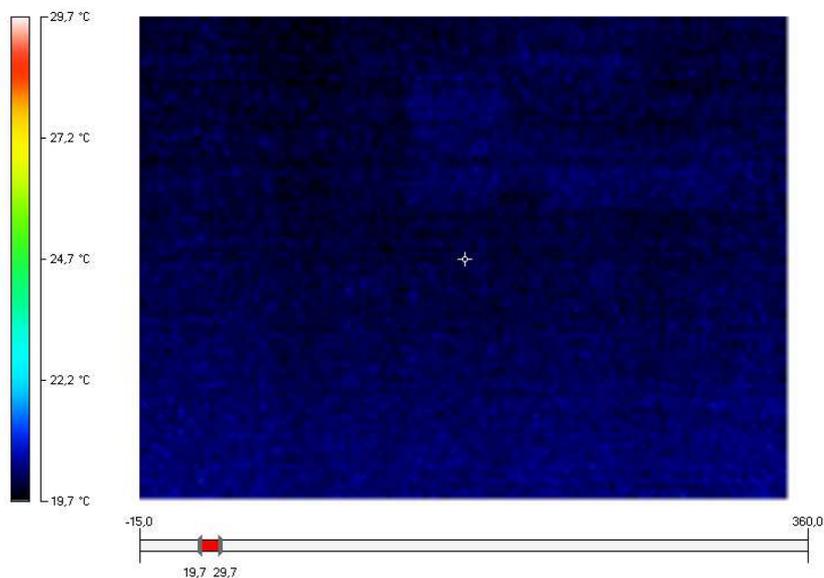


Abbildung 5.7: Aufnahme der Objektivverschlusskappe direkt nach der Kalibrierung des Detektors, außerhalb des Magnetfelds.

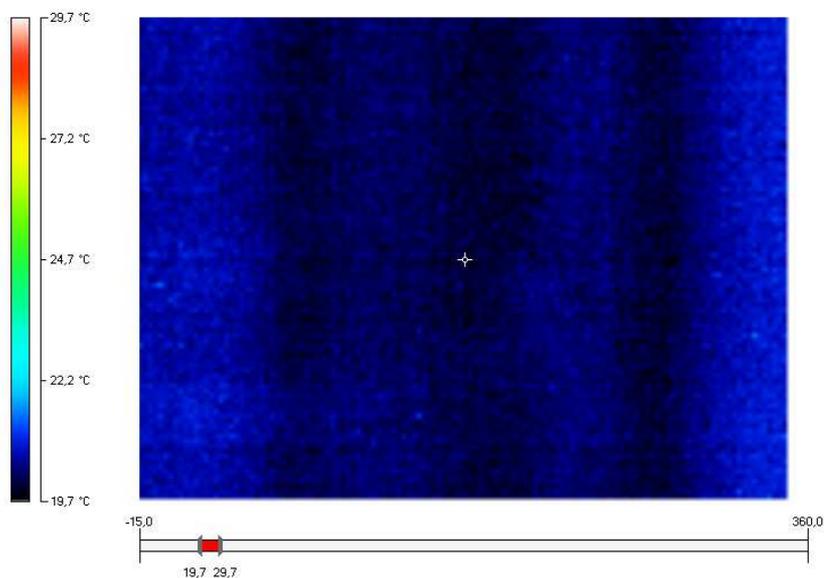


Abbildung 5.8: Aufnahme der Objektivverschlusskappe eine knappe Minute nach der Kalibrierung des Detektors, außerhalb des Magnetfelds. Die beobachteten Streifen sind vermutlich Nachwirkungen der Magnetfeldeinwirkung.

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

„Konzentrier Dich darauf, Sachen besser und nicht größer zu machen.“

aus Life's Little Instruction Book

Die Vermessung der Schutzabdeckungen unserer Myonkammern (Protective Cover, PC) hatte bei der Ausführung der Diplomarbeit eine große Priorität, da die meisten der MDT-Kammern eben mit diesen bedeckt sind, um sie vor allen Arten von Gefährdungen, insbesondere beim Transport und beim Einbau, zu schützen. Dies bedeutet auch, dass eventuell sich erhitzende MDT-Kammerbereiche diese Wärme per Konduktion an die Protective Covers weiterleiten. Der Wärmeleitkoeffizient λ von Aluminium beträgt ca. $\lambda_{\text{Alu}} = 237 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Da die Protective Covers ebenfalls, wie die Röhren der MDT-Kammern aus Aluminium bestehen, wurden umfangreiche Emissionsgrad-Bestimmungsmessungen an ihnen durchgeführt. Sämtliche Messungen wurden in einem abgeschlossenen Raum mit Klimaanlage durchgeführt, so dass die Randbedingungen (Temperatur, Lichteinfall) möglichst konstant gehalten werden konnten. Diese gliedern sich grob in zwei verschiedene Methodiken: indirekte und direkte Messung. Indirekt bedeutet, dass durch die Reflexion einer Hitzequelle im Cover dessen Emissionsgrad bestimmt wird. Direkt, dass die Platte geheizt wird, und so das Emissionsverhalten bestimmt wird. Da poliertes Aluminium als guter Spiegel wirkt, wurden bei indirekten Messungen hohe Temperaturmesswerte erwartet und damit eine gute Emissionsgradbestimmung (niedriger Emissionsgrad bedeutet hoher Reflexionsgrad). Auch waren sie weniger aufwendig zu realisieren, deshalb wurde sie zuerst durchgeführt. Das Prinzip, mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes das Emissionsverhalten von Aluminium ϵ_{Alu} zu bestimmen, ist im theoretischen Teil in den Kapiteln 2.4 und 2.5 dargelegt.

6.1 Kalibrierungsmessung Thermometer

Zuallererst müssen wir allerdings wissen, wie geeignet die Temperaturmessung mit den zur Verfügung stehenden Thermometern ist. In allen Messungen wurde auf zwei Messinstrumente zurückgegriffen, dem Kontaktthermometer 825-T4 der Firma testo und dem Präzisions-Stabthermometer P650 der Firma ThermoWorks mit Pt100-Fühler und Kalibrationsprotokoll. Diese wurden in ein wohltemperiertes Wasserbad gegeben, dessen Temperatur auf 0,1 Kelvin genau einstellbar und konstant gehalten werden konnte, siehe Abb. 6.1 und 6.2. Es wurden Messpunkte im Bereich von 10°C bis 70°C Kelvin genommen und gegen die Temperatur des Wasserbads aufgetragen. Ebenfalls wurde die Temperatur des Wassers mit Hilfe der Infrarotkamera NEC TH9100pro bei der kamerainternen Einstellung $\epsilon_{\text{Kam}} = 1,00$ gemessen und angetragen siehe Abb. 6.3. Eventuell bei

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

höheren Temperaturen auftretender Wasserdampf hat keinen Einfluss auf diese Messung, da sein Transmissionsgrad hier $\tau_{\text{H}_2\text{O}}=1$ beträgt, siehe auch die Rechnung im Anhang B.2.

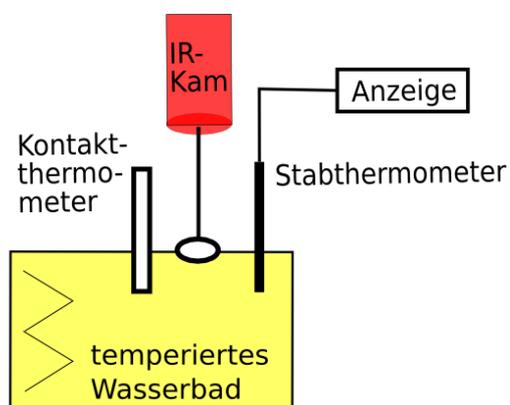


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit Wasserbad, Stab-, Kontaktthermometer, TH9100pro IR-Kamera



Abbildung 6.2: Aufbau mit Wasserbad und Styrodurabdeckung mit Öffnungen für die Thermometer, Kontaktthermometer (links), TH9100pro IR-Kamera (mittig oben) und Stabthermometer (rechts)

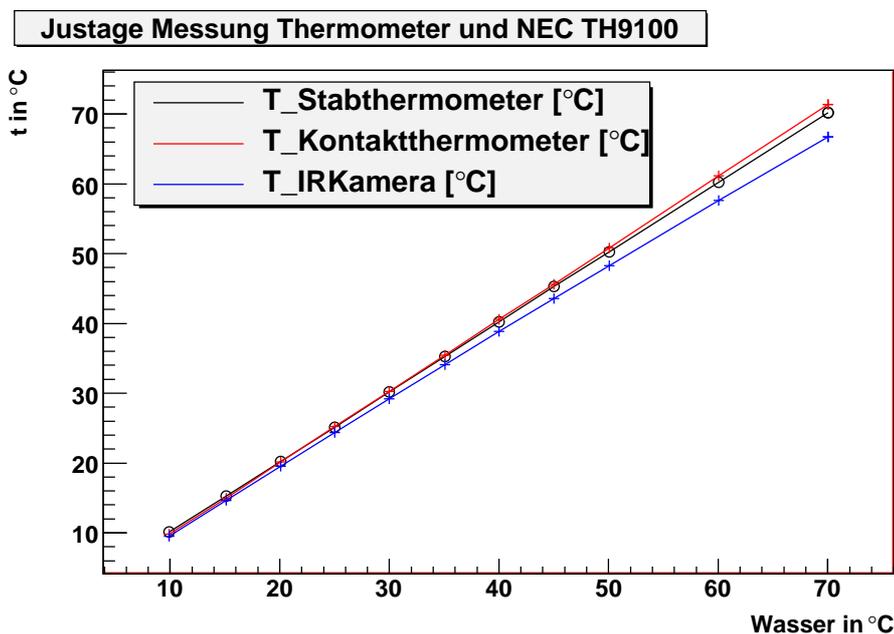


Abbildung 6.3: Angetragen sind die Temperaturmesswerte (t) der verschiedenen Geräte gegen die Temperatur des Wasserbades. Die Standardabweichung der jeweils mehrmals gemessenen Werte liegt bei $0,08$ K.

Es zeigt sich, dass das Stabthermometer in Relation zum Wasserbad konstant $+0,2 \pm 0,05$ Kelvin zuviel anzeigt und dass das Kontaktthermometer mit Zunahme der Temperatur des Wasserbades

(+1,5 Kelvin bei 70°C) im Rahmen der absoluten Messgenauigkeit zu leicht höheren Werten driftet. Das Stabthermometer wurde zusätzlich in Eiswasser getaucht, um die Genauigkeit bezüglich des Nullpunktes bestimmen zu können. Hierbei zeigte es Temperaturen von 0,06-0,10 °C. Somit wurde gezeigt, dass bei den hier zu untersuchenden Temperaturwerten um die 300 Kelvin die vorhandenen Temperaturmessgeräte als Referenztemperaturgeber geeignet sind. Das Kontaktthermometer und die Infrarotkameras haben einen absoluten Fehler von 2°C oder zwei Prozent, das Stabthermometer von 1°C oder einem Prozent, je nachdem was größer ist. Die relativen Fehler betragen maximal 0,11 K während der einzelnen Messungen, zumeist aber 0,08 K. Es zeigt sich aber auch, dass die Messkurve der IR-Kamera flacher verläuft als die der Thermometer. Das Stabthermometer (ein rein ohmscher Gühler mit Platin-Draht) ist als Referenztemperaturfühler am Besten geeignet und zeigt eine derart genaue Übereinstimmung mit den Temperaturwerten des vom Wasserbad gelieferten Messgerätes, dass sich vermuten lässt, es handle sich bei dessen Messgerät auch um einen PT100-Fühler. Die Temperaturwerte des Wasserbads (in °C) multipliziert mit dem Faktor 0,967 ergibt die Kurve der NEC IR-Kamera.

6.2 Abschätzung der maximalen Temporauflösung der Kameras

Berechnung der Temporauflösung, welche auf den Protective Covers wahrgenommen werden können, unter Standard-Laborbedingungen. Gerechnet mit den Vorgaben der FLUKE TI20, welche eine max. Auflösung von 0,1 Grad Celsius besitzt: Mit SBG nach Kapitel 2.2

$$T_M^4 = \epsilon_{\text{Alu}} \cdot T_O^4 + (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4 \quad (6.1)$$

umgeformt zu

$$T_O = \left(\frac{T_M^4 - (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4}{\epsilon_{\text{Alu}}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6.2)$$

mit folgenden Werten $T_M = 20 \pm 0,1^\circ\text{C}$ und $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054$ ergibt sich mit einem $T_{\text{Um}} = 20^\circ\text{C}$ nach dieser Rechnung eine Auflösung von $1,9 \pm 2,6^\circ\text{C}$

Berechnete Auflösung der NEC TH9100pro, welche eine max. Auflösung von 0,06 Grad Celsius besitzt: Dieselbe Rechnung mit denselben Werten bis auf $T_M = 20 \pm 0,06^\circ\text{C}$ führt zu einer Auflösung von $1,1 \pm 2,6^\circ\text{C}$. Falls man annimmt, dass die Angaben der NEC IR-Kamera, mit Mittelung über 30 Bilder auf eine Auflösung von $0,02^\circ\text{C}$ zu kommen, stimmt, so wären sogar $0,4 \pm 2,5^\circ\text{C}$ als Auflösung möglich.

Der Fehler wird gleich der Auflösung bei beiden IR-Kameras bei $T_M = 20 \pm 0,15^\circ\text{C}$, mit $2,7 \pm 2,7^\circ\text{C}$, das entspricht einer Objekttemperatur von $T_O = 20 \pm 2,7^\circ\text{C}$.

Angenommen wurden Fehlerwerte von $\Delta T_{\text{Um}} = 0,1^\circ\text{C}$, $\Delta T_M = 0,1^\circ\text{C}$, $\Delta \epsilon_{\text{Alu}} = 0,02$.

Der angegebene Fehler stammt aus:

$$\Delta T_O = \left(\frac{T_M^4 - (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4}{\epsilon_{\text{Alu}}} \right)^{-\frac{3}{4}} \cdot \left[\left(\frac{T_M^3}{\epsilon_{\text{Alu}}} \right)^2 \cdot \Delta T_M^2 + \left(\frac{T_{\text{Um}}^4 - T_M^4}{4 \cdot \epsilon_{\text{Alu}}^2} \right)^2 \cdot \Delta \epsilon_{\text{Alu}}^2 + \left(\frac{T_{\text{Um}}^3 \cdot (\epsilon_{\text{Alu}} - 1)}{\epsilon_{\text{Alu}}} \right)^2 \cdot \Delta T_{\text{Um}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.3)$$

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

Der Grund warum hier die Auflösung so große Fehler aufweist, ist der Fehler im bestimmten Emissionsgrad für Aluminium von 40%.

(Das hier sind alles relative Fehlerwerte! Absolut besitzt sowohl die FLUKE als auch die NEC IR-Kamera eine Fehlerabweichung von 2°C oder 2%, je nachdem was größer ist. Aus praktischer Erfahrung zeigt sich auch, dass die NEC TH9100pro unterhalb 20°C eine Abweichung von gut einem halben Grad Celsius nach unten besitzt. So werden Temperaturwerte von realen 18°C als 17,4°C angezeigt, usw.)

6.3 Die elektronischen Komponenten der MDT-Kammern

Die MDT-Kammer enthält auf einer Seite die Hochspannungs- (HV) Anschlüsse sowie Gaszuführung und auf der gegenüberliegenden Seite die Ausleseelektronik und den Gasauslass. Da uns eine Infrarotkamera zur Verfügung steht, kann die Wärmeentwicklung dieser Komponenten betrachtet werden. Sämtliche Infrarot-Aufnahmen in diesem Kapitel wurden der besseren Betrachtbarkeit wegen nachbearbeitet und weisen unterschiedliche Temperaturskalen auf. Lichtbild und Infrarotaufnahme wurden gegenübergestellt.



Abbildung 6.4: Fotografie des Gaseinlass-Systems

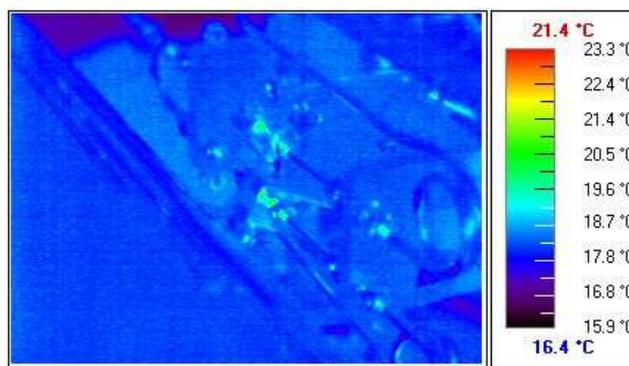


Abbildung 6.5: IR-Aufnahme des Gaseinlasssystems. Die wärmeren Regionen sind durch Reflexion der Körperwärme des Experimentators verursacht.

Man sieht in Bild 6.4 und 6.5, dass das MDT-Gassystem keine Wärmeentwicklung erzeugt, sondern auf Umgebungstemperatur liegt. Dies ist auch zu vermuten, da sich keinerlei wärmeentwickelnden elektronischen Komponenten daran befinden, und das zuströmende Gas etwaige Wärme mit sich fortführen würde. Dass Reflexionen durch die Körperwärme des Experimentators verursacht werden, wurde hier und bei den folgenden Bildern durch weitere Aufnahmen unter anderen Winkeln bestätigt.

Generell erzeugen die Komponenten der HV-Seite der MDT-Kammern keine Abwärme, die über die Raumtemperatur hinausgingen, oder anders ausgedrückt, es gibt HV-seitig keine Wärmequellen, siehe Abb. 6.6 bis 6.9. Anders verhält es sich bei der Read Out Seite. Dort werden die Daten, welche die Kammern liefern, verarbeitet und weitergeleitet. Dazu sind Mezzaninkarten in Faradaykäfigen, diverse Stecker und Auslesekarten angebracht.

6.3 Die elektronischen Komponenten der MDT-Kammern

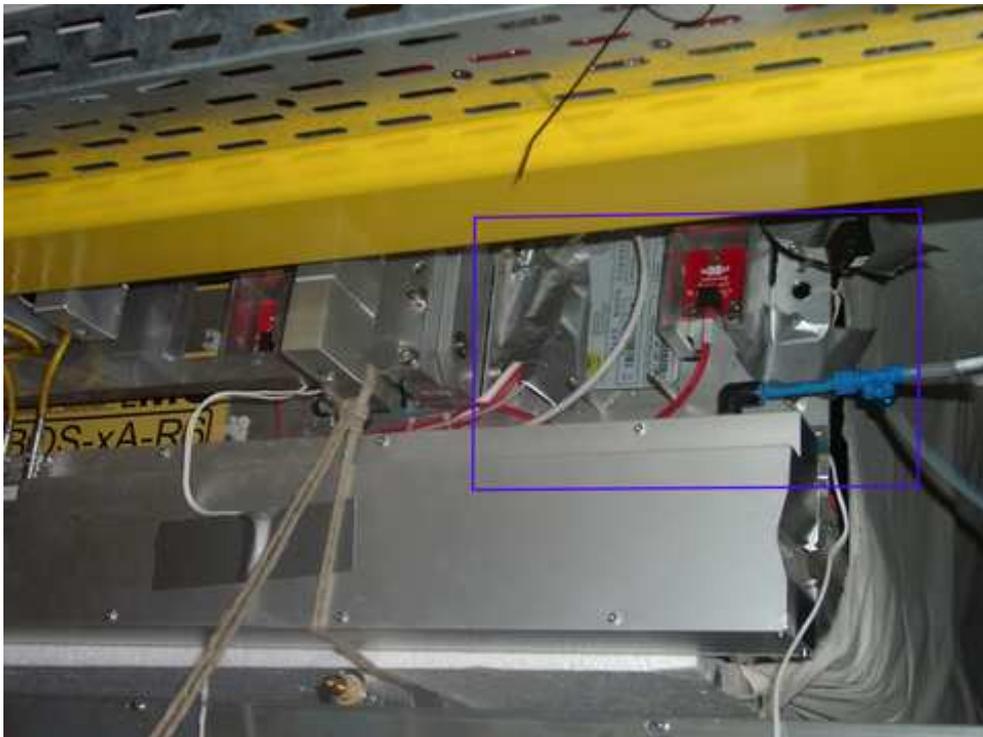


Abbildung 6.6: Fotografie der rechten HV-Seite der BOS-MDT-Kammer. Der gelbe Balken stellt die Trägerstruktur des Myonendetektor-Messstands der LMU dar. Der eingezeichnete Rahmen gibt den IR-Bildabschnitt in Abb. 6.8 wider.

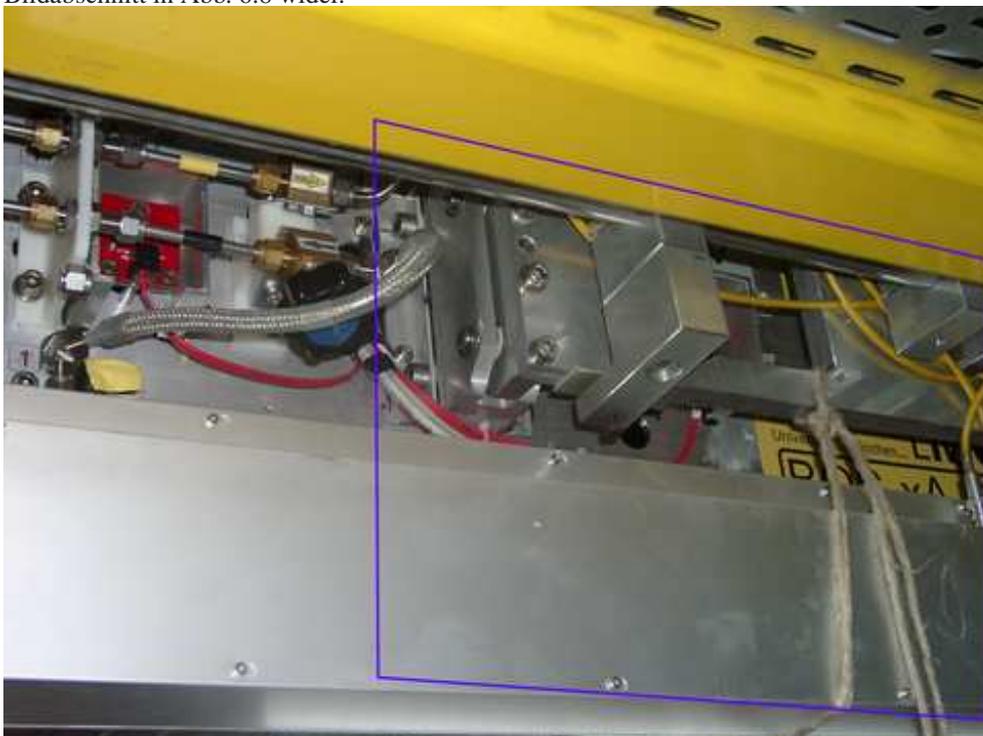


Abbildung 6.7: Fotografie der linken HV-Seite der BOS-MDT-Kammer, mit angedeutetem Bildausschnitt des IR-Bildes 6.9

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

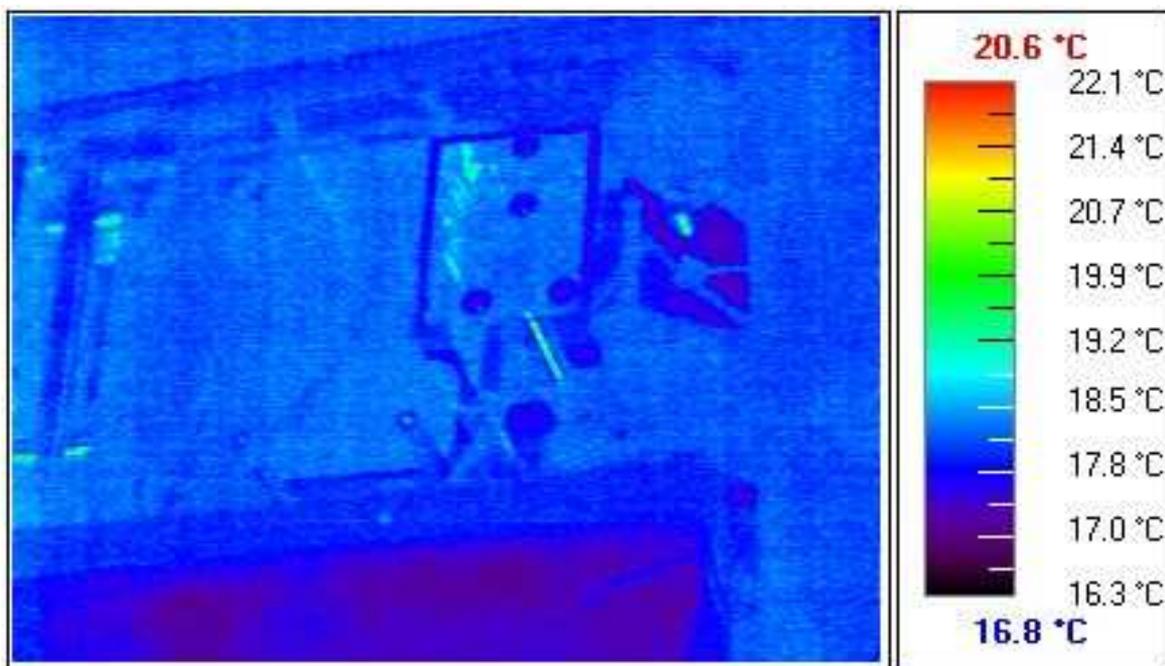


Abbildung 6.8: IR-Aufnahme der rechten High Voltage Seite der BOS-MDT-Kammer. Die wärmeren Regionen sind durch Reflexion der Körperwärme des Experimentators verursacht.

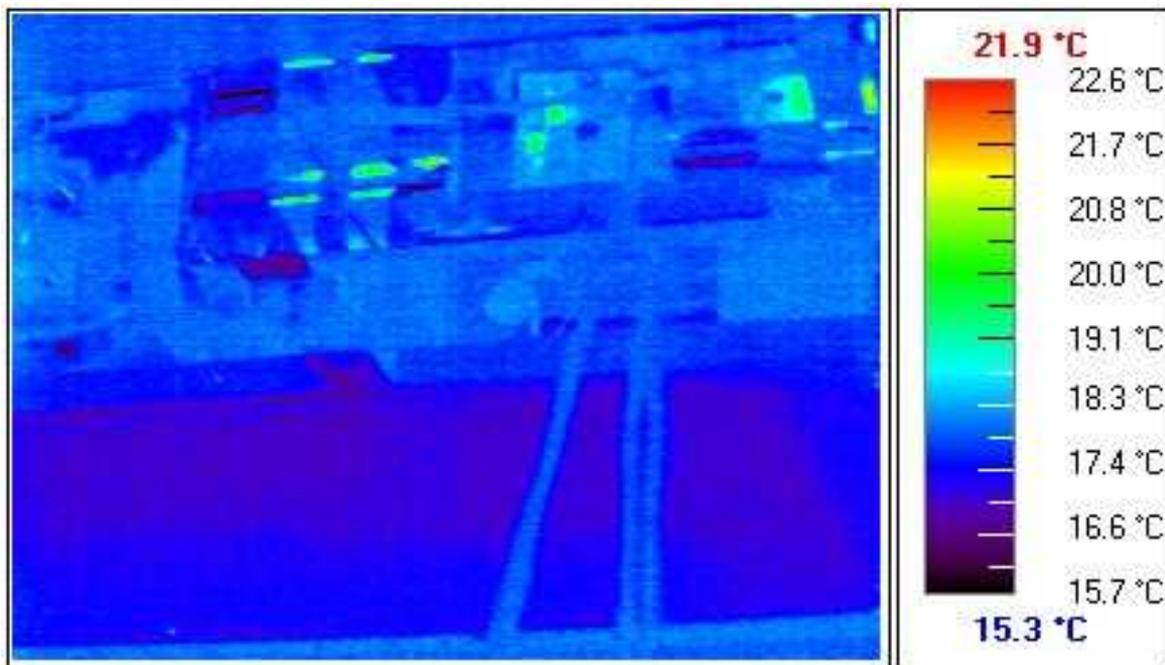


Abbildung 6.9: IR-Aufnahme der linken High Voltage Seite der BOS-MDT-Kammer. Die wärmeren Regionen sind durch Reflexion der Körperwärme des Experimentators verursacht.

6.4 Indirekte Emissionsgradbestimmung ϵ_{Alu}

Diese Zuführungsstecker erwärmen sich auf ca. 32 bis 40°C wie man in Abb. 6.10 und 6.11 sehen kann, 6.12 zeigt eine normale Lichtbildaufnahme, Abb. 6.13 und 6.14 die Auslesekarten die sich auf einer Temperatur von 40 bis 60°C befinden.

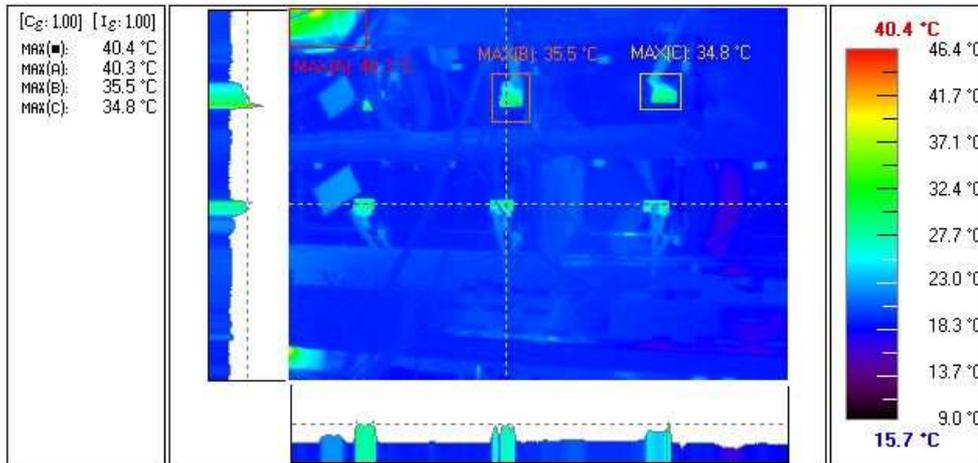


Abbildung 6.10: IR-Aufnahme mehrerer Stecker der BOS-MDT-Kammern, eine zugehörige Lichtbildaufnahme wird nicht gezeigt. Die Ansicht ist aber ähnlich zur linken Hälfte von Bild 6.12

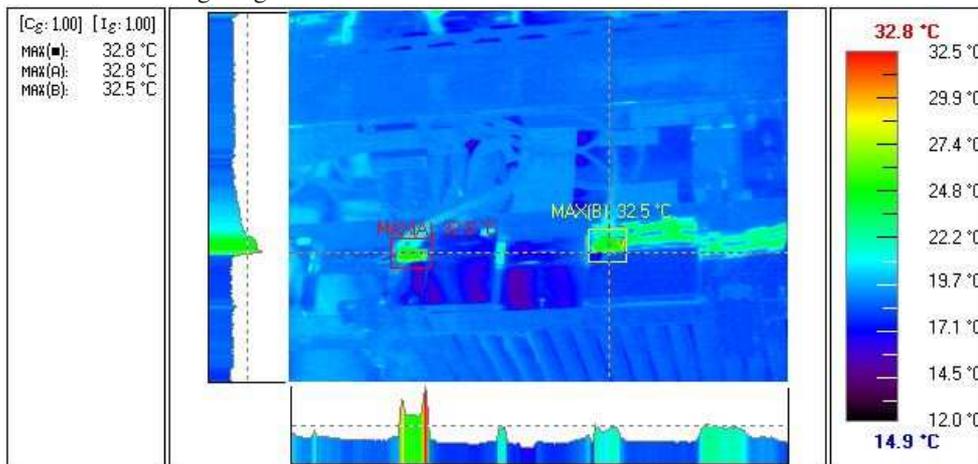


Abbildung 6.11: Eine weitere IR-Aufnahme der Stecker der BOS-MDT-Kammern. Die grünlichen „Streifen“ neben dem rechten Stecker (gelb umrandet) entstehen durch Reflexion des Hallenlichts.

6.4 Indirekte Emissionsgradbestimmung ϵ_{Alu}

Zunächst wurde, auch in Hinblick auf die Handhabung der Messung, diese in zwei Teile unterteilt. Eine Messung mit zweifacher, siehe Abb. 6.16 und 6.17 und eine mit einfacher Reflexion, siehe Abb. 6.15. Beide sollten nach den im theoretischen Teil 2.4 dargelegten Methode zu ähnlichen und sich so bestätigenden Ergebnissen kommen. Eigenreflexion durch die IR-Kamera und den Expe-

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

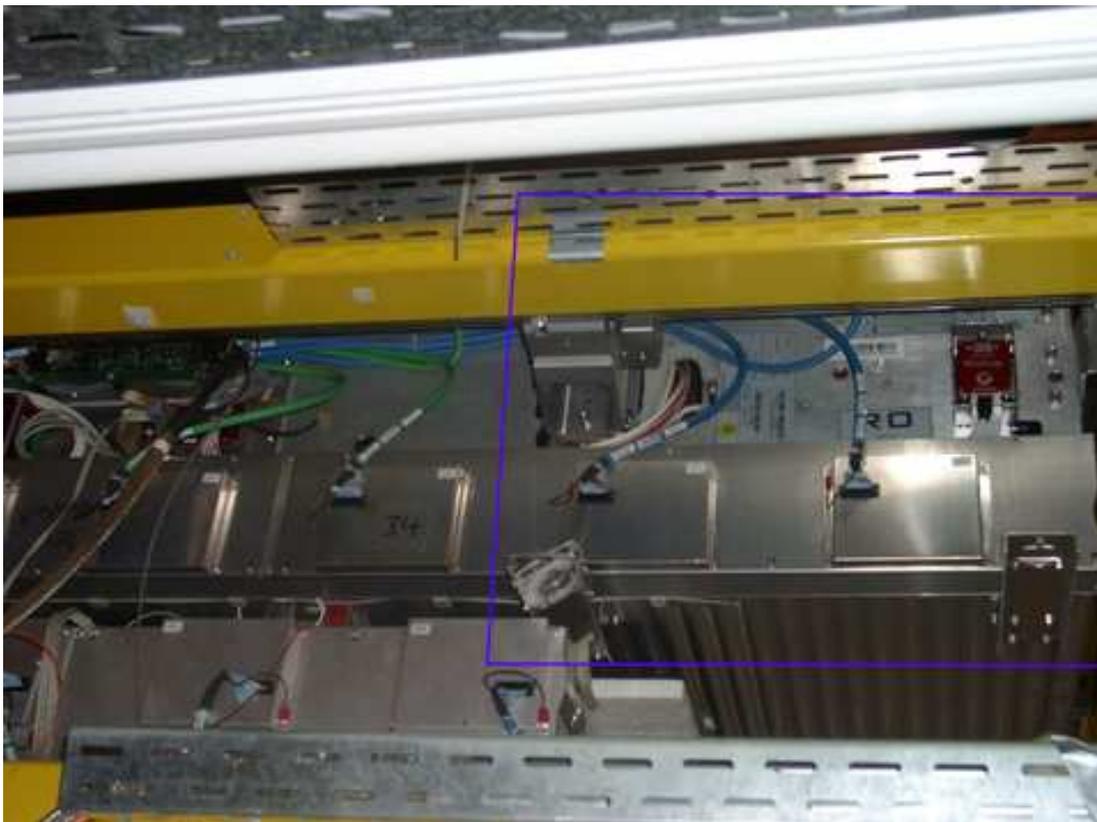


Abbildung 6.12: Fotografie des Stecker-Systems der BOS-MDT-Kammer, mit angedeutetem IR-Ausschnitt zu Bild 6.11.

6.4 Indirekte Emissionsgradbestimmung ϵ_{Alu}

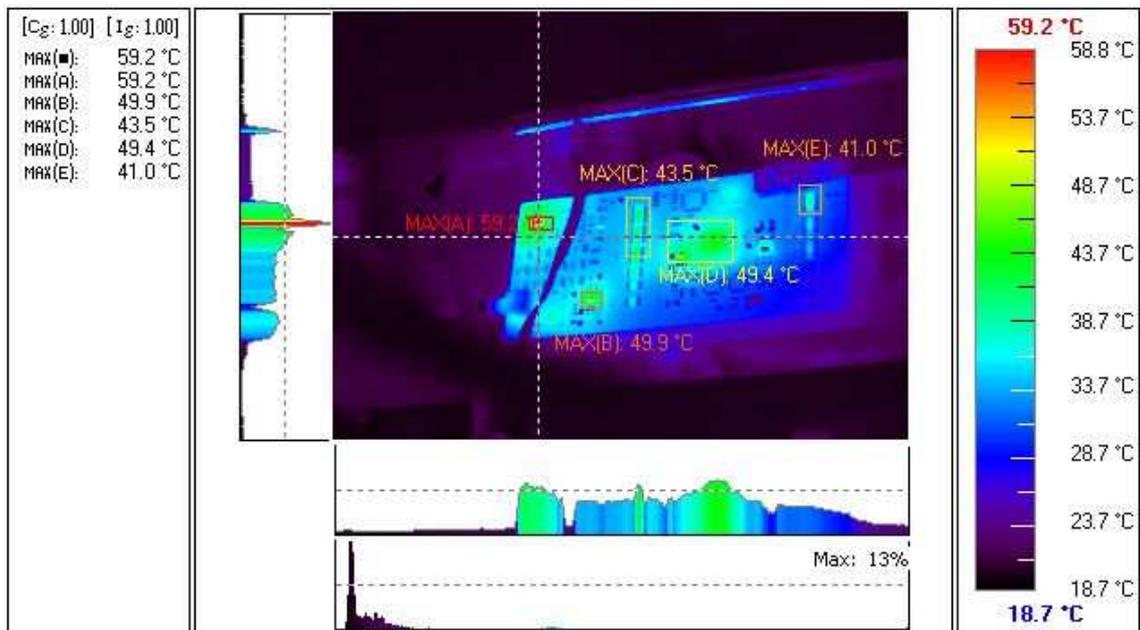


Abbildung 6.13: IR-Aufnahme der Auslesekarte der BOS-MDT-Kammer.



Abbildung 6.14: Fotografie der Auslesekarte der BOS-MDT-Kammer.

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

Experimentator wurden durch den Aufbau der Protective Cover im 90°-Winkel zueinander vermieden. Der generelle Messaufbau:

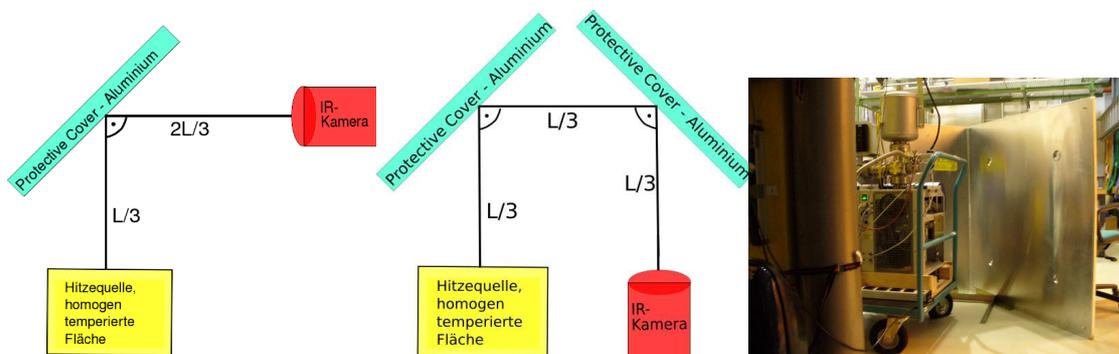


Abbildung 6.15: Schematische Darstellung, Einfachreflexion. Abstand $L=1,40\text{m}$.
Abbildung 6.16: Schematische Darstellung, Doppelreflexion. Abstand $L=1,40\text{m}$.
Abbildung 6.17: Foto des Aufbaus

In diesem Fall wurde als Hitzequelle die Vakuumpumpe eines Quadrupolmassenspektrometers benutzt. Dieses hatte den Vorteil, dass die Pumpe durchgehend lief und daher konstante Temperatur hielt.¹ Auf der Pumpe befinden sich verschiedene Strukturen, ein Aluring mit Glasfläche und eine homogen temperierte Fläche, welche am Infrarotbild gut wiedererkannt werden konnte und groß genug sind für die Auflösung der Kamera so dass die Temperaturmessung unabhängig wird vom Abstand. Der Abstand der Kamera zur Pumpe (optischer Weg) beträgt 1,4 m. Die Abstände zu den Protective Cover betragen jeweils $\frac{1}{3}$ dieser Strecke. Es werden die jeweiligen Aufnahmen, zunächst die der Doppel-Reflexion aufgenommen, siehe Abb. 6.16 und auch mit dem Kontaktthermometer gemessen. Danach wird das zweite Protective Cover abgebaut, die Kamera entsprechend umgesetzt, aber die sonstigen Abstände zur Kamera gelassen, siehe Abb. 6.15. Erneut werden die Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in der Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die Kürzel MR, HF und UR stehen für bestimmte Flächen auf der Pumpe. MR: Mitte des Alurings (Glas), HF: Homogen erhitze Fläche der Pumpe neben des Alurings und UR: Unterhalb des Ringes (heißeste Fläche der Pumpe) (vgl. IR-Aufnahme 6.33). Diese Methode zur Bestimmung von ϵ_{Alu} ist unabhängig vom Material der betrachteten Ursprungsfläche (Hitzequelle)!

Die Ergebnisse in Tabelle 6.1 passen im Rahmen ihrer Fehler zueinander. Dadurch dass in die Doppelreflexionsmessung Streuung zweifach eingeht, erhöhen sich die Fehler in den Messwerten gezwungenermaßen. Deshalb liegen diese Emissionsgradwerte auch höher als bei der Einfachreflexionsmessung. Die Fehler sind mit ca. 40% relativ hoch, was sich aber angesichts des geringen Emissionsgrades von Alu mit dieser Methode kaum verringern lässt. Inwiefern hier auch die Streuung Anteil am Ergebnis hat, wird später untersucht.

¹Es handelte sich um eine Drehschieberpumpe im Dauerbetrieb, die durch ein 1-Liter Ölbad geschmiert wurde, das somit als konstant warmes Temperaturresevoir diente.

6.5 Direkte Emissionsgradbestimmung ϵ_{Alu}

2AP:1AP	Mess 15.6.07			$\epsilon_{Kam} = 1,00$	Abstand=140cm
	T_M IR-Kam	T_M IR-Kam	T Kontaktth.	T_{UM}	ϵ_{Alu}
	RTC=21, [°C]	RTC=OFF, [°C]	[°C]	[°C]	
Für 2fach					
HF	44,0	44,0	46,3	21	$0,10 \pm 0,04$
MR	42,3	42,3	43,7		$0,10 \pm 0,04$
UR	44,6	44,7	48,6		$0,11 \pm 0,04$
Für 1fach					
HF	46,9	46,9	47,8		$0,08 \pm 0,03$
MR	44,9	44,9	46,5		$0,07 \pm 0,03$
UR	47,9	47,8	49,0		$0,09 \pm 0,03$

Tabelle 6.1: Doppel- & Einfach-Reflexionsmessung, aufgenommen mit der FLUKE TI20, zur ϵ -Bestimmung. Hitzequelle: Vakuumpumpe des QMS, mit folgenden betrachteten Flächen: MR=Mitte des Alurings (Glas), HF=Homogen erhitze Fläche der Pumpe und UR=Unterhalb des Ringes (heißeste Fläche der Pumpe). 2fach=Doppelreflexion, 1fach=Einfachreflexion.

6.5 Direkte Emissionsgradbestimmung ϵ_{Alu}

Zur direkten Emissionsgradbestimmung, siehe Abb. 6.18 und 6.19. Die Messung wurde, wie in den theoretischen Überlegungen in Kapitel 2.5 beschrieben, mit Hilfe eines Heizlüfters und der Abschirmung durch schwarzen Stoff und Styroporplatten durchgeführt. Dadurch sollte vermieden werden, dass reflektierende Infrarotstrahlung des Hallenlichts oder der umliegenden Wände das Ergebnis verfälschen. Dieser Aufwand, wie in Abbildung 6.20 zu erkennen, wurde auch in Hinblick auf die bereits als groß bekannten Messfehler betrieben. Der Heizlüfter wurde hinter das Protective Cover gestellt. Dieses Vorgehen verhindert, dass Fehler durch Reflexionen des Heizlüfters im Protective Cover entstehen und auch, dass die warme Luftströmung des Heizlüfters das Messergebnis des angebrachten Thermometers verfälscht. Generell sollte bei direkter Bestimmung darauf geachtet werden, dass sich das Objekt bei Messung in einem thermodynamischen Gleichgewicht befindet und keiner plötzlichen Temperaturänderung ausgesetzt wird.

T_M [°C]	T_O [°C]	ϵ_{Alu}	Fehler $\Delta\epsilon_{Alu}$	T_{Um} [°C]
19,90	20,40	-0,2494	0,82	20,0
20,50	31,51	0,0411	0,02	$\Delta T_M, \Delta T_{Um}$ [°C]
20,90	35,75	0,0530	0,02	0,2
20,95	36,20	0,0543	0,02	ΔT_O [°C]
21,10	38,60	0,0541	0,01	0,1

Tabelle 6.2: Ergebnis der direkten Bestimmung $\epsilon = 0,054 \pm 0,02$.

Wie in der Tabelle 6.5 zu sehen, wird der erste Wert der Emissionsgradbestimmung negativ, dies lässt sich auf die Messungenauigkeiten der verwendeten Temperaturmessgeräte zurückführen. Da-

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

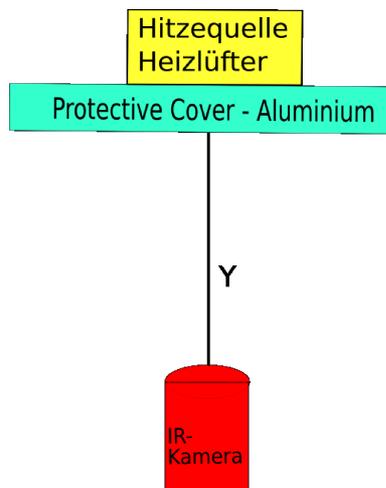


Abbildung 6.18: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit Hitzequelle, Protective Cover und IR-Kamera. Der Abstand betrug $Y=1,40\text{m}$.

Abbildung 6.19: Eigentlicher Aufbau



Abbildung 6.20: Tatsächliche Messanordnung, abgeschirmt.

durch ergibt sich ein niedrigerer T_M -Wert als die Umgebungstemperatur T_{Um} beträgt. Dadurch, dass in der entsprechenden Formel (siehe Theorie-Kapitel 2.5)

$$\epsilon_{\text{Alu}} = \frac{T_M^4 - T_{Um}^4}{T_O^4 - T_{Um}^4}, \quad (6.4)$$

die Umgebungstemperatur T_{Um} vom Messwert T_M abgezogen wird, ergibt sich in diesem Fall ein negativer Emissionsgrad ϵ_{Alu} . Ansonsten ergeben sich Ergebnisse ($\epsilon = 0,054 \pm 0,02$), die am

6.6 Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades

unteren Ende der Fehlereingrenzung der indirekten Messung ($\epsilon_{\text{Alu}} = 0,08 \pm 0,03$) liegen. Aber auch hier liegt der Fehler wieder bei 40 Prozent. Da hier aber keinerlei Streuung eingehen kann, ist dieser Wert als der Genauere anzunehmen. Das Ergebnis der direkten Messung wurde aber vielfach bestätigt.

6.6 Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades

Es ist bekannt, dass Emissionsgrade abhängig vom Messwinkel sein können. Besonders Metalle sind von dieser Eigenschaft betroffen. Bisher wurden sämtliche Emissionsgradbestimmungsmessungen mit einem Winkel zur Normalen von $30 - 40^\circ$ getätigt. Dies hatte den Vorteil, dass die Reflexion von Kamera oder Experimentator keinen Fehler in der Messung verursacht. Würde diese Vorgehensweise einen systematischen Fehler in den in Kapitel 6.5 gemachten Messungen einbringen? Daher wurde eine Messung, beschrieben in den Bildern 6.21 und 6.22, mit Hilfe einer Winkelplatte durchgeführt.

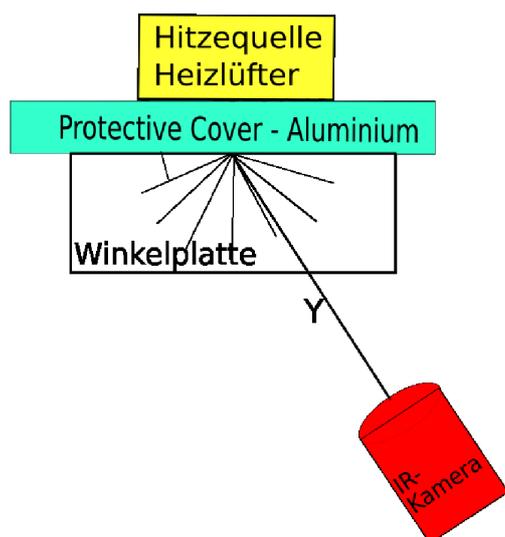


Abbildung 6.21: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit Hitzequelle, Protective Cover und IR-Kamera. Der Abstand betrug $Y=1,0\text{m}$.



Abbildung 6.22: Aufbau des Winkelabhängigkeitsmessung mit Winkelplatte (Boden), Protective Cover (hinten) und Stabthermometer.

Bei dieser Messung wurde darauf geachtet, dass sich die Hitzequelle und die Kamera auf gleicher Höhe befanden. Da hier die Eigenreflexion der Kamera in dem Protective Cover auftritt, war deshalb eine Messung bei der Normalen nicht möglich.

In Abb. 6.23 ist die Abhängigkeit dargestellt. Interessanterweise nimmt der Emissionsgrad bei steigendem Winkel um $0,00055$ pro Grad zu. Bei der Ausführung des Experiments wurde darauf geachtet, dass die Walzrichtung des Protective Covers keinerlei Einfluss nimmt. Daraus kann geschlossen werden, dass die vorhergenannten Methoden der Emissionsgradbestimmung in der

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

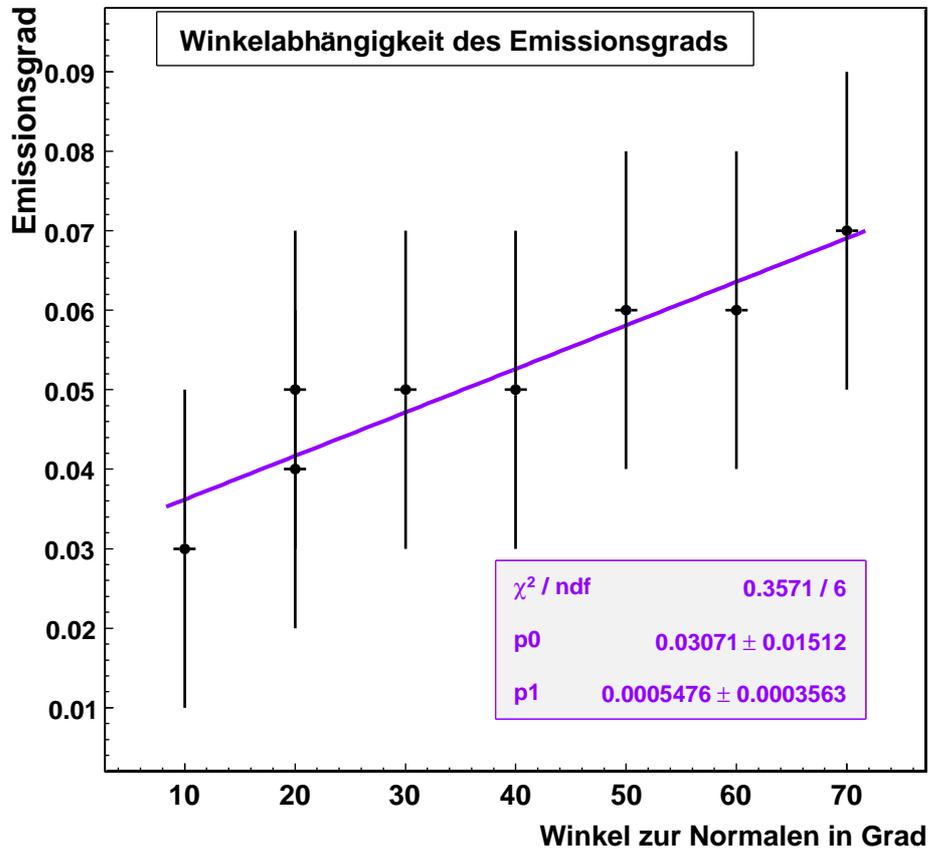


Abbildung 6.23: Emissionsgradabhängigkeit des Protective Cover vom Winkel.

gerade aufgezeigten Art und Weise vom Winkel abhängig sind. Aus der gemachten Messung kann nun auch auf den Emissionsgradwert bei 0° zur Normalen geschlossen werden. Wie man in Abb. 6.23 erkennt, ergibt sich so ein $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,03 \pm 0,02$. Dieser Wert liegt noch innerhalb des Fehlers des durch direkte Messung bestimmten Emissionsgrades von $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054 \pm 0,02$. Es ist auch zu bemerken, dass eine Kontrollmessung auch noch einen Emissionsgradwert von $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,05 \pm 0,02$ für den Winkel 20° zur Normalen ergeben hat. Die Fehler sind also nicht zu unterschätzen. Die Steigung der in Abb. 6.23 ist knapp signifikant, mit einem $\sigma = 1,5$. Dies zeigt nur umso genauer, unter welchen Bedingungen diese Messungen entstanden. Da aber jegliche Emissionsgradbestimmung im ATLAS-Detektor unter einem Winkel $\geq 30^\circ$ erfolgen wird, da sonst Eigenreflexion auftritt, ist die Annahme von $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054 \pm 0,02$ für das Protective Cover generell ein vernünftiger Wert. Wenn die Messwinkel zur Normalen bekannt sind, kann mit dem zugehörigen Emissionsgrad gerechnet werden. Die Literatur gibt für poliertes Aluminium, was unserem Fall entspricht, als Emissionskoeffizienten $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,04$ bis $0,06$ [13] an.

6.7 Einflussnahme von heißer Luft auf die Messungen.

Die Frage, ob erwärmte Luft als Strahlungsquelle zu einer Reflektion in den Protective Covers führt, ist relativ einfach zu beantworten: nein, da Gase einen sehr geringen Emissionsgrad nahe 0 aufweisen [13]. Dennoch haben wir das Ganze simuliert, indem wir einen Heizstrahler so gestellt haben, dass die warme Luft parallel zum Protective Cover strömt ohne direkten Wärmekontakt mit diesem. Es musste darauf geachtet werden, dass der Strahler genügend weit von der Platte positioniert ist.

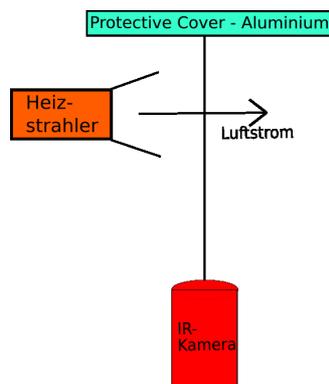


Abbildung 6.24: Schematische Darstellung



Abbildung 6.25: Foto des Aufbaus

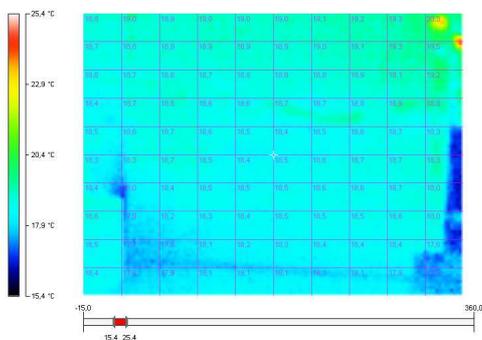


Abbildung 6.26: IR-Foto bevor der Heizlüfter eingeschaltet wurde.

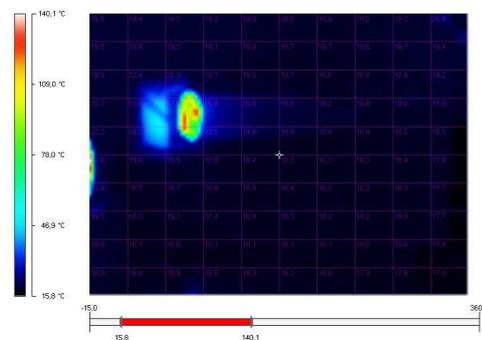


Abbildung 6.27: IR-Foto während des Versuchs, ohne Abschirmung. Man erkennt die Reflexion des Heizlüfters im Protective Cover

Wie erwartet wurden keine durch erhitzte Luft verursachte Reflexionen wahrgenommen. Die Ergebnisse sind gut nachvollziehbar. Die durch den Heizlüfter auftretende Streuung, die im Bild 6.28 zu sehen ist, war zu erwarten, da diese Messung mit demselben Cover durchgeführt wurde, wie auch die Streuungsmessung in Methode 2, Kapitel 6.11 (vgl. auch Abb. 6.34). Auch wurde diese Messung durch weitere Messungen bestätigt.

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

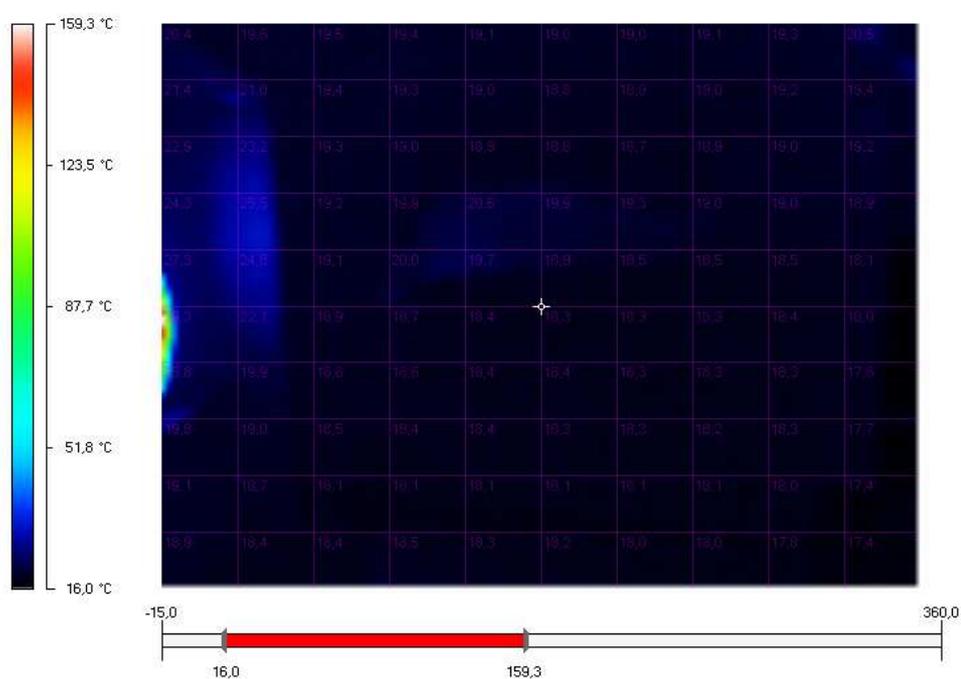


Abbildung 6.28: IR-Foto, keine Spiegelung der erhitzten Luft erkennbar. Die leicht erwärmt erscheinende Stelle ist Streuung, am Protective Cover durch Spiegelung des Heizlüfters verursacht. (Vgl. vorheriges Foto 6.26 und 6.27)

6.8 Vorzugsrichtung des Protective Covers

Gibt es eine Vorzugsrichtung des Protective Covers, welche bei den Emissionsgradmessungen eine Rolle spielen könnten? Fielen also die Ergebnisse der vorgestellten Emissionsgradbestimmung anders aus, wenn man die Covers drehen würde? Diese Frage musste geklärt werden, da bei optischer Prüfung der Cover die Walzrichtung zu sehen ist und optische Reflexionen verwischt erscheinen. Dazu wurde eine Anordnung gewählt, bei der die Infrarotstrahlung einer Hitzequelle, unter einem definierten Winkel, auf das Protective Cover fällt und dieses jeweils um 90 Grad gedreht wird. Insgesamt wurde das Cover also viermal um 90° gedreht. So wurden systematische Fehler minimiert. Sollte nun der Temperaturmesswert der einen Drehrichtung mit dem der nächsten Drehrichtung übereinstimmen, so wäre gezeigt, dass Drehung keine Änderung bewirkt, und somit die Walzrichtung keine meßbare Auswirkung auf die Temperaturnahme durch die IR-Kameras hat. Wenn die Oberfläche eine Rolle spielte, so würden sich durch Drehung bei der Temperaturmessung (T_M) unterschiedliche Werte derselben Ausgangstemperatur (T_O) ergeben. Aus einem handelsüblichen Stickstoffdewar und aufgeschäumten Polyethylen wurde ein genäherter Hohlraumstrahler als Hitzequelle aufgebaut. Es wurde Wasser als Hitzequelle verwandt. Das Polyethylen wurde mit einem Loch mit 2,2 cm Durchmesser versehen, so dass die durch die verspiegelte Oberfläche des Dewargefäßes mehrfach gespiegelte Strahlung durch dieses austreten konnte.



Abbildung 6.29: Bild des einseitig mit Alupapier verkleideten Pfropfens mit Loch.



Abbildung 6.30: Fertiger Hohlraumstrahler aus Stickstoffdewar und Polyethylenpropfen.

Die Ergebnisse dieser Messung sind in der Tabelle 6.3 zusammengefasst, wobei hier das Augenmerk auf die Spalte mit $RTC=21$ und $\epsilon = 0,99$ gelegt werden sollte, da die hier aufgezeigten Messwerte, der Drehung zeitlich am nächsten aufeinander folgt. Da die Messung mit erhitztem Wasser in einer Thermoskanne als Hohlraumstrahler und Hitzequelle gemacht wurde, dieses aber während der Messung verständlicherweise Wärme an die Umgebung abgegeben hat, nehmen sämtliche Temperaturmesswerte während des Experiments ab. Auch hat die Drehung der Platte stellenweise länger Zeit in Anspruch genommen, so dass dadurch die Messwertunterschiede während der ersten und dritten Drehung zustande kommen. Die Aussagekraft des Experiments ist aber dadurch nicht beeinträchtigt, da ansonsten auch Unterschiede während der zweiten und der vierten Drehung zurück zum Ausgangszustand aufgetreten wären, was nicht der Fall war. Es wurde somit gezeigt, dass die Temperaturergebnisse soweit unabhängig von der Oberflächenstruktur des Pro-

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

Tabelle 6.3: Ergebnis der Drehmessung. Die dritte Spalte zeigt bei Drehung keine oder nur zeitbedingte Abweichungen der Messwerte. Somit ist der Nachweis erbracht, dass sämtliche via Reflexion gewonnenen indirekten Temperaturmessungen oberflächenunabhängig sind. Aus den fettgedruckten Ergebnissen wurde ein $\varepsilon = 0,14 \pm 0,08$ berechnet. Wegen des Temperaturverlusts der Hitzequelle ist diese Berechnung mit einem großen Fehler verbunden.

	T_M	T_M	T_M	$T_{STWasser}$
	RTC OFF	RTC OFF	RTC=21	
	°C	°C	°C	°C
	$\varepsilon = 1,00$	$\varepsilon = 0,99$	$\varepsilon = 0,99$	
	IR-Kam	IR-Kam	IR-Kam	
Direkte Messung	79,2	78,9	78,4	82,0
	79,7		79,1	
ReflexMess PC, Abstand 140cm				
	68,7	69,1	69,7	
			68,3	
1. 90° Drehung in UZS				
	67,3	67,9	68,3	
			67,3	
2. 90° Drehung in UZS (180°)				
	65,1	65,5	66,1	
			65,6	
3. 90° Drehung in UZS (270°)				
	64,3	64,7	65,6	
			64,7	
			64,3	72,1
4. 90° Drehung in UZS AusgPos.				
	63,2	63,7	63,8	
Direkte Messung hinterher				
	68,8	69,2	69,3	
	68,6		68,9	
		69,0	68,1	70,0
Nach $(T_M^4 - T_O^4)/(T_U^4 - T_O^4)$				
$\varepsilon =$	0,14			

6.8 Vorzugsrichtung des Protective Covers

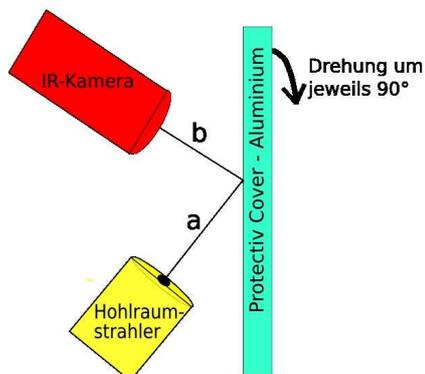


Abbildung 6.31: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit Hitzequelle, Protective Cover und IR-Kamera.



Abbildung 6.32: Eigentliches Aufbau

ective Covers sind. Dies wird auch dadurch angedeutet, dass eventuell auftretende Reflexionen sehr klar und scharf umrissen zu erkennen sind, wie in Abbildung 6.33.

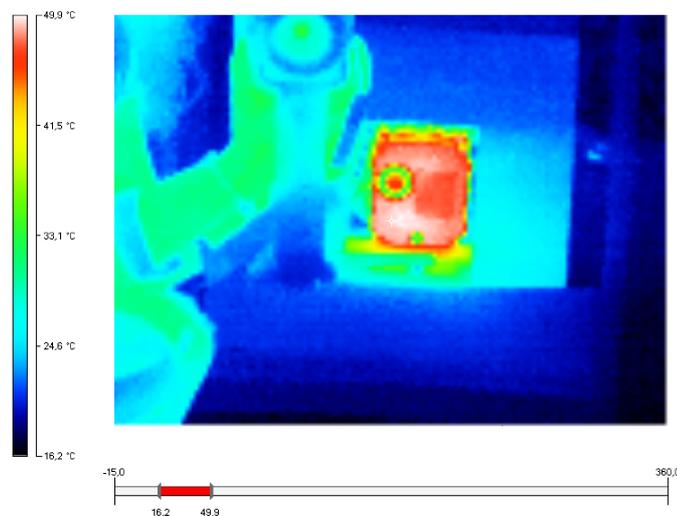


Abbildung 6.33: Erkennbar die Reflexion der Vakuumpumpe des Quadrupolmassenspektrometers, der Kamera und des Experimentators, zur Veranschaulichung wie gut Reflexion an dem Protective Cover auftritt. Aufgenommen mit der FLUKE TI20, mit einer Auflösung von 96 auf 120 Pixel.

Diese Drehmessung wurde zu Beginn der Diplomarbeit am Protective Cover durchgeführt. Später wurden dann verfeinerte Methoden für die Bestimmung der Streuung am Cover eingesetzt, bei denen sich ebenfalls zeigte, dass die Walzrichtung keinerlei Auswirkung auf die Temperaturmessung hat, jedoch auf die Auswertung der Streuungsanteilsbestimmung. Hierbei wurden Aufnahmen von Reflexionen der Vakuumpumpe als Hitzequelle gemacht. Diese zeigen bei Drehung deutlich, dass

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

die Walzrichtung des Covers eine leichte Streukomponente mit Vorzugsrichtung hervorbringt, wie in Abb. 6.34 und 6.35 zu sehen. Es wurden auch noch Aufnahmen bei gedrehtem Cover durchgeführt, die dies ebenfalls bestätigen.

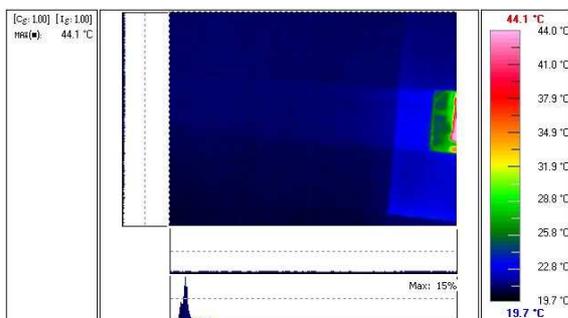


Abbildung 6.34: IR-Aufnahme der Reflexion einer Vakuumpumpe am parallel zur Pumpe gestellten Protective Cover.

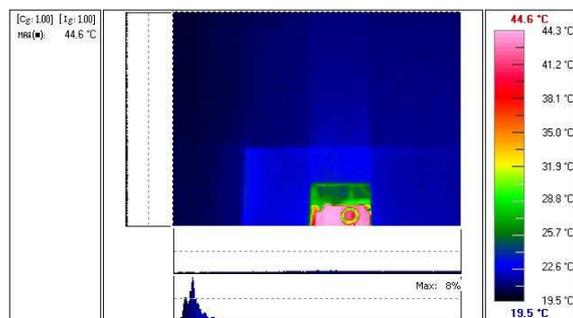


Abbildung 6.35: IR-Aufnahme der Reflexion einer Vakuumpumpe, die Kamera wurde um 90° gegen UZS gedreht.

Die Auswirkung wird im Anschluss in Kapitel 6.10 diskutiert.

6.9 Emissionsgrade verwendeter Bestandteile im ATLAS-Experiment

Da auf den Protective Covers stellenweise Aufkleber oder andere Fremdstoffe mit Emissionsgrad nahe 1 angebracht wurden, war es besonders von Interesse deren Emissionsgrad zu bestimmen, da sie zur Temperaturbestimmung besonders geeignet sind. Der jeweilige Emissionsgrad wurde weitgehendst durch direkte Bestimmung, bei der die Hitzequelle durch das zu bestimmende Objekt abgeschirmt wurde, ermittelt. Bei der Bestimmung des Emissionsgrades der gelb-gestrichenen Stahlkonstruktion des LMU-Myondetektorprüfstandes, in dem die MDT-Kammern kalibriert wurden, musste allerdings frontal erhitzt werden, und es wurden Vorkehrungen getroffen, dass weder die Reflexion noch die Konduktion durch die erhitzte Luft an das Kontaktthermometer das Ergebnis verfälschten. Es ergaben sich folgende Werte, die in Tabelle 6.4 zusammengefasst sind.

6.10 Einfluss der Streuung auf die Messungen - Methode 1

Da die erste Messung mit der indirekten Messungsmethode, siehe Kapitel 2.4 und Anhang B, Emissionsgradwerte ergab, die eine halbe Größenordnung über denen der direkten, weniger fehlerbehafteten lag, wurde spekuliert, ob diese nicht durch zusätzlich wahrgenommene, aber nicht darauf korrigierte Streuung zustande kommen.

Um eine Methode zur Streuungsbestimmung durchzuführen, wurde die Reflexion einer Hitzequelle in einem Protective Cover betrachtet. In dieser Reflexion im Protective Cover erkennt man eindeutig die Hitzequelle, und der Rest des Bildes (die Umgebung um die Hitzequelle) erscheint im

6.10 Einfluss der Streuung auf die Messungen - Methode 1

Tabelle 6.4: Emissionsgradtabelle verschiedener im ATLAS-Myonspektrometer verwendeter Materialien.
* siehe Kapitel 7.1

Emissionsgrad von	ϵ
Prot. Cover (Alu)	$0,054 \pm 0,02$
Rohrlagen der MDT-Kammer (Alu) aus einer Langzeitmessung*	$0,11 \pm 0,04$
Rundes Loch in Longbar aus einer Langzeitmessung*	$0,57 \pm 0,02$
Kammernschonbezug	$0,91 \pm 0,02$
gelber Stahlträger des Cosmic Ray Messstands	$0,70 \pm 0,02$
LMU Aufkleber (groß)	$0,77 \pm 0,02$
MPI Aufkleber	$0,98 \pm 0,02$
MPI Plastikschild	$0,95 \pm 0,02$
Gaffertape silber (no-Name)	$0,79 \pm 0,02$
Schwarzes Isolierband (aus dem CERN-Laden) Blickdicht, zum Umwickeln der PMTs	$0,99 \pm 0,02$
Isolierband schwarz (dehnb. PVC, Coroplast)	$0,94 \pm 0,02$
Isolierband grün (dehnb. PVC, Coroplast)	$0,92 \pm 0,02$
Paketband (no-Name, dt. Produktion) durchsichtig-braun	$0,59 \pm 0,02$

Vergleich zur Hintergrundtemperatur (T_{Um}) wärmer. Aus dieser zusätzlichen Wärme im IR-Bild der Reflexionsmessung wurde versucht den Streubeitrag zu bestimmen.

Daher war der Messaufbau wie folgt angelegt: Es wurde die Hitzequelle (Vakuumpumpe) mit Styropor verdeckt und ein Quadrat mit Seitenlänge 2 cm, welches den Blick auf die homogen-temperierte Fläche freigibt, hineingeschnitten. Danach wurde, wie bei der Anordnung zur indirekten Emissionsgradbestimmungsmessung, das Protective Cover aufgestellt, so dass der optische Weg von 90 cm einen Winkel von 90° zur Kamera machte. So wurden einfach-reflektierte Aufnahmen, die den Streuanteil beinhalten, welcher von diffuser Reflexion, die von der Hitzequelle verursacht wird, herrührt. Der Aufbau ist in Abb. 6.36 dargestellt. Danach wurden direkte Aufnahmen getätigt um auch die Gesamtintensität (nach SBG, siehe 2.2) von der Hitzequelle erfassen zu können. Die gemachten Infrarotaufnahmen wurden mit der NEC TH9100pro gemacht.

Die Daten, der im Bild 6.38 gezeigten Messung wurden in Octave [40] (ein Programm für numerische Berechnungen mit Hilfe von Matrizen) geladen². Als Reflexionsbild wurde der gesamte Bereich gewertet, der wärmer als 25°C erscheint. Als Maß für die relative Leistung wurde die vierte Potenz der Temperatur dieses Bereichs aufsummiert und die (in diesem Bereich) vom Hintergrund erwartete Leistung (ca. $(273,16 + 19,4)^4$) abgezogen³. Das Ergebnis beträgt $4,2 \cdot 10^{11} \text{K}^4$. Die entsprechende korrigierte Summe⁴ für den Rest des Bildes ergibt $6,7 \cdot 10^{12} \text{K}^4$ ist also um mehr

²Befehl: data=load("10.csv")

³Befehl: sum(sum(((data+273.16).^4-(273.16+19.4)^4).*(data>25)))

⁴Befehl: sum(sum(((data+273.16).^4-(273.16+19.4)^4).*(data<=25)))

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

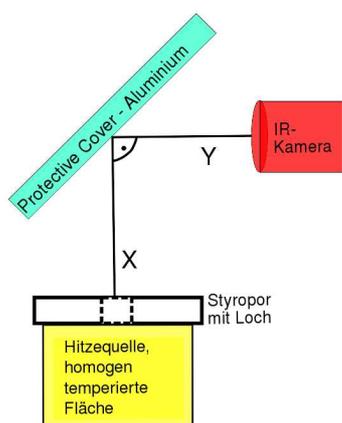


Abbildung 6.36: Schematische Darstellung



Abbildung 6.37: Foto des Aufbaus

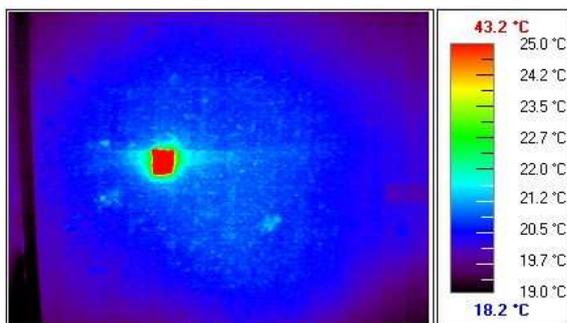


Abbildung 6.38: IR-Aufnahme der eindeutig erkennbaren Reflexion der Hitzequelle (Viereck) und der asymmetrischen Streuung um diese am Protective Cover.

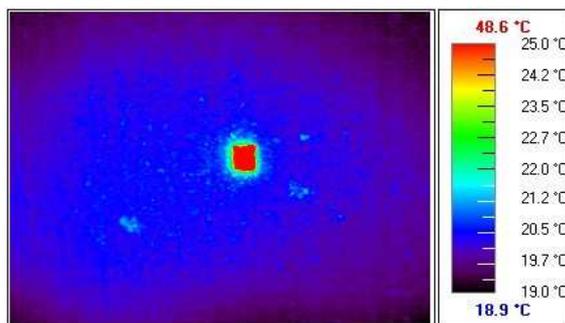


Abbildung 6.39: Direkte IR-Aufnahme der Hitzequelle (Viereck) und der als kühleren Bereich wahrzunehmenden Umgebung im Vergleich zu Abb. 6.38.

6.11 Einfluss der Streuung auf die Messungen - Methode 2

als eine Größenordnung größer. Diese Summe kann also, da größer, nicht allein das Maß für die gestreute Leistung sein. (Mit anderen Worten, die Streuung kann keine höhere Leistung als die Reflexion haben.)

Eine direkte Aufnahme zeigt, dass auch hier die direkte Umgebung der Hitzequelle im Vergleich zum Hintergrund wärmer erscheint. Die bei der indirekten Messung beobachtete Wärme in der Umgebung wird folglich nicht allein durch die Streuung am Protective Cover verursacht. Man könnte nun die Streuung dadurch bestimmen, dass die Differenz der Leistung zwischen direkter und indirekter Messung über den gesamten Detektor betrachtet wird. Wenn jetzt die Differenz von direkter und indirekter Messung für einen Pixel, von denen es 320×240 gibt, einen Fehler von 0,1 K hätte, so wäre der Gesamtfehler dieser Streuungsmessmethode ungefähr $\Delta p_{\text{Streu}} = (290,1^4 - 290^4) \cdot 320 \cdot 240 \approx 7 \cdot 10^{11} \text{ K}^4$. Dieser Fehler ist größer als der Vergleichswert $4,2 \cdot 10^{11} \text{ K}^4$ (s.o.). Da die Differenz zwischen zwei Bildern der Kamera einen Fehler >100% aufweist, ist diese Methode nicht geeignet, die Streuung zu bestimmen.

6.11 Einfluss der Streuung auf die Messungen - Methode 2

Methode 2 beruht auf der Möglichkeit, die Streuungsanteile eines Punktes des Protective Covers unter verschiedenen Winkeln messen zu können und so die Gesamtstreuung durch Integration über die Halbkugel zu bestimmen, siehe Abb. 6.40 und 6.41. Die Gesamtintensität wird hierbei durch eine Direktaufnahme unter der Anwendung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes, siehe Kapitel 2.2, gewonnen. Der Aufbau des Experimentes war wie folgt: In die Styroporabdeckung um die Hitzequelle wurde ein der Hitzequelle entsprechendes Loch geschnitten. Eine Winkelplatte am Boden gab die Winkelstellung der Kamera zum betrachteten Punkt an. Dieser war bei parallel gestelltem Protective Cover der Punkt, bei dem die Rückreflexion auf die Winkelnormale die Höhe der Kamera erreicht, bei gegebenem Abstand von 1,70m. Dieser Abstand ist auch der optische Abstand der Kamera zum Objekt in diesem Experiment. Es wurden Einfachreflexionsaufnahmen bei 23° 30° 40° 50° 60° und 70° zur Normalen, bei konstantem Abstand von 1,70m zur Hitzequelle vermessen. Es wurden jeweils Aufnahmen ohne Abdeckung als auch mit Abdeckung der Hitzequelle getätigt. Die Mittelung über die mehrmals gemessene Temperatur T_{NV} der betrachteten Fläche, aus den Aufnahmen, bei denen die Hitzequelle unverdeckt ist (Index NV wie nicht verdeckt), ist das eine Ergebnis. Die Mittelung über die mehrmals gemessene Temperatur T_{V} der Aufnahmen, bei denen die Hitzequelle verdeckt ist, ist das andere (Index V wie verdeckt) und beschreibt den Effekt der Hintergrundstrahlung (Raumtemperatur).

A ist die betrachtete Fläche auf dem Protective Cover, die von einem Pixel der Kamera gesehen wird, wenn diese senkrecht zur Blickrichtung steht, und P ist die Leistung, die gestreut wird. Die Streuintensität in der zu betrachtenden Halbkugel ergibt sich zu folgendem Integral (siehe auch Kapitel 2.3):

$$\frac{P}{A} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{A} \frac{dP}{d\omega} \sin\theta d\theta d\phi \quad (6.5)$$

$$(6.6)$$

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

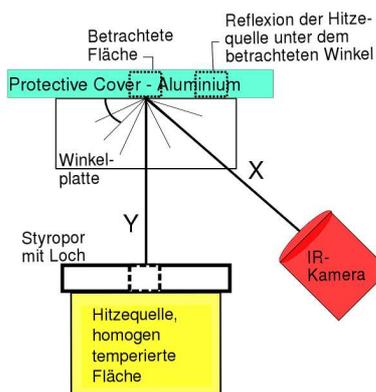


Abbildung 6.40: Schematische Darstellung.
 $X+Y=1,70\text{ m}$



Abbildung 6.41: Foto des Aufbaus

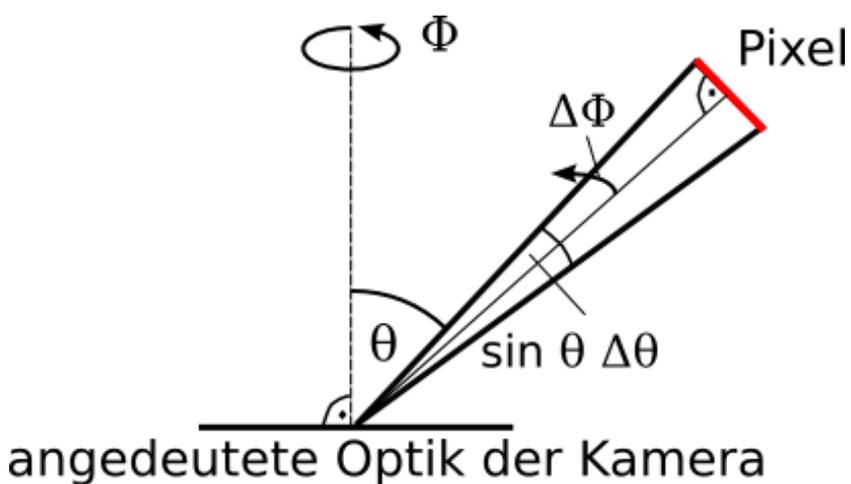


Abbildung 6.42: Ein Pixel der Detektorfläche hat die Winkelausdehnung $\Delta\omega = \sin\theta\Delta\theta\Delta\phi$

6.11 Einfluss der Streuung auf die Messungen - Methode 2

Wobei $\frac{dP}{d\omega}$ die aus dem Raumwinkel ω kommende Strahlstärke ist. Wenn P_{Pix} , die von einem Pixel empfangene Leistung ist, so wird die Strahlstärke bei senkrecht zur Kameramessungsrichtung stehender Quellen- oder Spiegelfläche A von der Kamera als $\frac{\Delta P_{\text{Pix}}}{\Delta\omega}$ wahrgenommen. Ist nun diese Fläche A um den Winkel θ zur Normalen geneigt, so sieht der Pixel die Fläche $A/\cos\theta$ und es ergibt sich $\frac{dP}{d\omega} = \frac{\Delta P_{\text{Pix}}}{\Delta\omega} \cos\theta = \frac{\Delta^2 P_{\text{Pix}}}{\Delta\phi \sin\theta \Delta\theta} \cos\theta$. Der Raumwinkel $\Delta\omega$ in der von der Kamera wahrgenommenen Strahlstärke $\frac{\Delta P_{\text{Pix}}}{\Delta\omega}$ wird hier durch die Ausdehnung des Pixels der Kamera definiert. Dieses benötigt die Winkelweite $\sin\theta\Delta\theta (= -\Delta\cos\theta)$ (siehe Abb. 6.42) und $\Delta\phi$.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{A} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\Delta^2 P_{\text{Pix}}}{\Delta\phi \sin\theta \Delta\theta} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (6.7)$$

$$= \frac{2\pi}{A} \int_0^{\pi/2} \frac{\Delta P_{\text{Pix}}}{\sin\theta \Delta\theta} \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (6.8)$$

$$= \frac{2\pi}{A} \int_0^{\pi/2} \frac{\Delta P_{\text{Pix}}}{-\Delta\cos\theta} \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (6.9)$$

$$= \frac{2\pi\sigma_B}{A} \int_0^{\pi/2} A_{\text{Pix}} \frac{\Delta(T_{\text{NV}}^4 - T_V^4)}{-\Delta\cos\theta} \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (6.10)$$

Die Funktion $\frac{\Delta(T_{\text{NV}}^4 - T_V^4)}{-\Delta\cos\theta}$ wird durch eine durch die Werte für die verschiedenen Winkel gefittete Gaußfunktion

$$G = A^* e^{\frac{-\theta^2}{2\sigma^2}} \quad (6.11)$$

ersetzt, siehe Bild 6.43.

Eingesetzt in das Integral, ergibt sich so als Streuungsanteil:

$$\frac{P}{A} = \frac{2\pi\sigma_B}{A} \int_0^{\pi/2} A_{\text{Pix}} A^* e^{\frac{-\theta^2}{2\sigma^2}} \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (6.12)$$

$$= \frac{2\pi\sigma_B}{A} \int_0^{\pi/2} A_{\text{Pix}} (4,99 \pm 1,70) e^{\left(\frac{-\theta^2}{2 \cdot (0,298 \pm 0,044)^2}\right)} \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (6.13)$$

$$= (0,248 \pm 0,107) \cdot 10^9 \cdot \sigma_B . \quad (6.14)$$

Nach SBG (siehe Kapitel 2.2) gilt auch:

$$\frac{P_G}{A} = \sigma_B T^4 \quad (6.15)$$

für die spezifische Gesamtintensität P_G/A . Eingesetzt ergibt sich hier:

$$\frac{P_G}{A} = \sigma_B T^4 = 9,4 \cdot 10^9 \cdot \sigma_B . \quad (6.16)$$

Der Streuanteil ergibt sich somit zu gut zweieinhalb Prozent ($2,6\% \pm 1,1$) an der Gesamtintensität.

6 Messung des Emissionsgrades eines Protective Covers

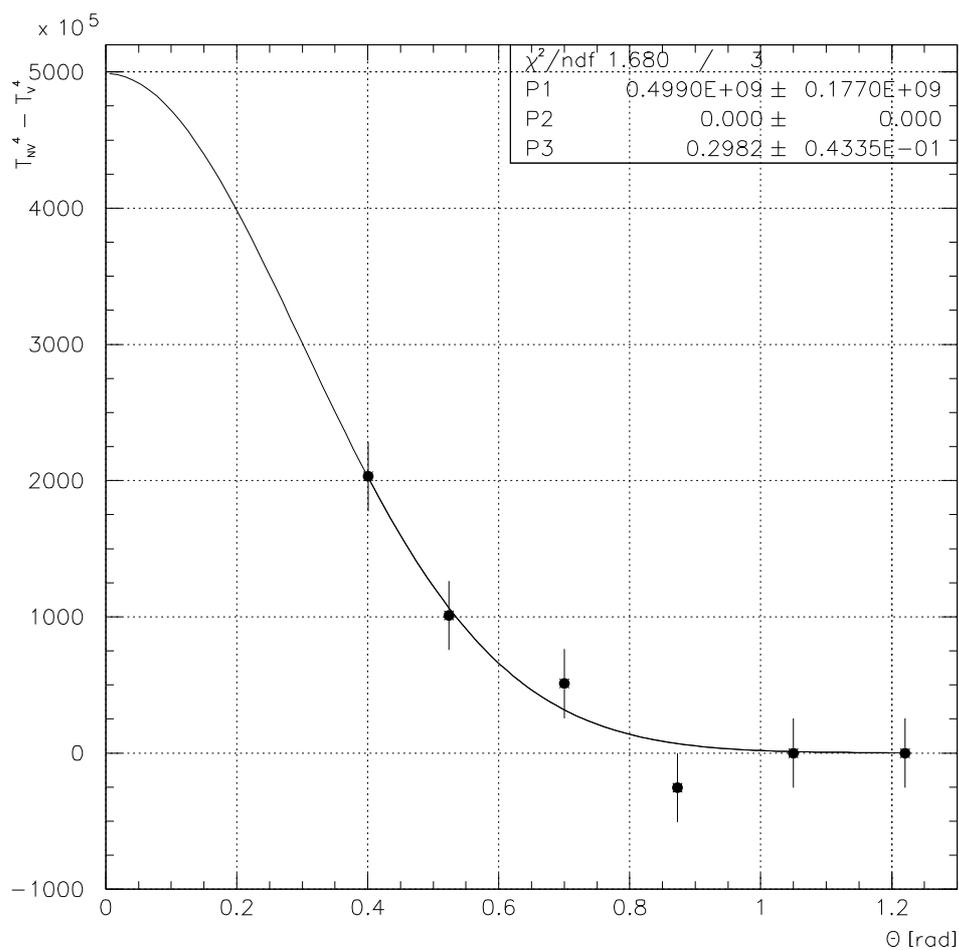


Abbildung 6.43: Gefittete Gaußfunktion. Nach rechts Winkel θ in rad, nach oben als Leistungsmaß $\Delta(T_{NV}^4 - T_V^4)/(-\Delta \cos \theta)$ in $[K^4]$. $G = A^* \exp(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2})$ mit $A^* = (4,99 \pm 1,70) \cdot 10^8$, $\sigma = 0,298 \pm 0,044$

7 Temperaturen der MDT-Kammern

*„In truth there is no better place to be
Than falling out of darkness still to see.“
The Delgados - The Light Before We Land*

7.1 Die Struktur der Rohrlagen und die Öffnung im Longbar

In den vorherigen Kapiteln wurden um die Abstrahl- und Reflexionseigenschaften des Protective Covers untersucht. Aber auch über die restlichen Bestandteile der Kammern, wie die Rohrlagen, kann man durch Experimente Aussagen treffen. Die Rohrlagen der Kammern bestehen ebenso wie die Protective Covers aus Aluminium. Auch hier sollte der Emissionsgrad von $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054$ zutreffen. Wenn wir einen Blick auf die Auswertung werfen, so stellen wir fest, dass die Struktur der Rohrlagen zu einem höherem Emissionsgrad ϵ_{Alu} führt. Die Bestimmungsmethode war die direkte Methode nach Kapitel 2.4. Hierbei wurde der Aufbau benutzt, den Albert Engl für die Erhitzung der untersuchten MDT-Kammern aufgebaut hatte [9]. Dieser bestand aus einer in Stoff gehüllten MDT-Kammer, die von vorne wahlweise durch einen oder zwei Heizlüfter beheizt werden konnte, siehe Abb. 7.1 bis 7.4.

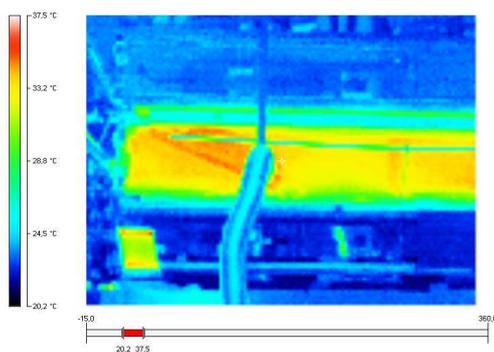


Abbildung 7.1: IR-Aufnahme der beheizten Kammer, linke Seite

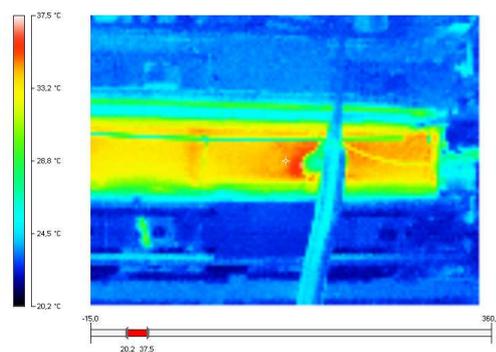


Abbildung 7.2: IR-Aufnahme der beheizten Kammer, rechte Seite

Mein Aufbau bestand nun darin, einen Teil des Stoffs am Rande der MDT-Kammern (HV-Seite) zu entfernen, und hier die Rohrlagen, sowie das dortige Loch im Longbar und eine dort zusätzlich angebrachte Aluminiumplatte zu vermessen. Diese Gebiete wurden bei der Langzeit-Messung mit

7 Temperaturen der MDT-Kammern



Abbildung 7.3: Foto-Aufnahme der beheizten Kammer, linke Seite



Abbildung 7.4: Foto-Aufnahme der beheizten Kammer, rechte Seite, mit Versuchsaufbau.

der IR-Kamera besonders betrachtet. Es wurden zusätzliche Temperatursensoren auf den Aluröhren (T18), der Aluplatte (T5) und dem Longbar (T6) angebracht, siehe Abb. 7.5 um eine Referenz für die durchgeführte Messung mit der NEC IR-Kamera zu erhalten. Dann wurde die Langzeitmessung mit Erwärmungs- und Abkühlphase der Kammer mit der IR-Kamera gestartet. Im Infraroten sieht das Ganze dann wie in Bild 7.6 aus.

Wenn man nun die Temperatursensoren gegen die zugehörigen IR-Temperaturmessbereiche des Aufbaus plottet, ergeben sich folgende Ergebnisse.

Wie im Plot 7.7 gut zu sehen, variieren die Daten, die man von den Rohrlagen erhält, in der Temperatur, je nachdem welchen Bereich der Rohre man betrachtet. Da die Rohrlagen Umgebungslicht/wärme reflektieren, aber sich auch gegenseitig abschirmen, war dies zu erwarten. Interessant wäre es, zu erfahren, ob es möglich wäre, aus der Temperaturdifferenz der Bereiche G (heißeste Stelle) und B (kälteste Stelle) eine Art Thermometer für die wahre Temperatur anzufertigen. Leider reichte die Zeit für die hier vorgelegte Arbeit für solch weiterführenden Studien nicht aus. Der Emissionsgrad, der sich für beide Bereiche errechnet, ist $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{heiß}}} = 0,19 \pm 0,04$ und $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{kühl}}} = 0,03 \pm 0,04$. Als Mittelwert ergibt sich so ein $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{gem}}} = 0,11 \pm 0,04$ (hierbei wurden die zugehörigen Temperaturwerte zu den vorherig genannten Emissionsgraden $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{kühl}}}$ und $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{heiß}}}$ gemittelt und dann der Emissionsgrad $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{gem}}}$ aus diesen bestimmt, so wird der Fehler minimiert). Es sei darauf hingewiesen, dass die Bezeichnung subjektiv ist. Ein großer Bestandteil des heißen (und auch kühlen) Teils ist durch Reflexion der Umgebung zustande gekommen! Anders herum gerechnet, ergäbe das nach Kapitel 8.1 ein $T_{\text{O}_{\text{gem}}} = 32,64 \pm 4,85^{\circ}\text{C}$ (bei $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054 \pm 0,02$, $T_{\text{Um}} = 19,6 \pm 0,01^{\circ}\text{C}$). Der gemessene $T_{\text{O}_{\text{gem}}} = 26,1^{\circ}\text{C}$, wäre also mit den gemachten Angaben außerhalb der Fehler. Setzte man stattdessen $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{gem}}} = 0,11$ ein, ergäbe es $T_{\text{O}_{\text{gem}}} = 26,22 \pm 1,45^{\circ}\text{C}$.

Nach Kapitel 8.2, in dem gezielt herbeigeführte Temperaturdifferenzen K zur Bestimmung der Objekttemperatur T_{O} diskutiert werden, kommt es bei einer Erwärmung um $K = (\Delta T_{\text{O}_{\text{gem}}}) = 22,18 \pm 8,5^{\circ}\text{C}$ von der Anfangstemperatur $T_{\text{M1}} = 20,5^{\circ}\text{C}$, zu einem $T_{\text{O}_{\text{gem}}} = 42,7^{\circ}\text{C} \pm 8,5^{\circ}\text{C}$. Ebenfalls weit entfernt von dem, was der Realität entspricht. (Mit bei $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054 \pm 0,02$, $T_{\text{Um}} = 19,6^{\circ}\text{C} \pm 0,01$, $d = 0 \pm 0,1$ K. Auch hier gilt: Verwendet man $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{gem}}} = 0,11$, so ergibt sich ein $K = 10,72 \pm 2,2^{\circ}\text{C}$).

7.1 Die Struktur der Rohrlagen und die Öffnung im Longbar



Abbildung 7.5: Aufnahme des Aufbaus. Linker Hand die über die Kammer angebrachte zusätzliche Aluplatte (mit Temperatursensor T5), rechts unten die drei Rohrlagen (gleich rechts außerhalb des Bildes befindet sich der Temperatursensor T18), darüber der Longbar (mit Temperatursensor T6, unsichtbar, etwa hinter T5 angebracht.) Rechter Hand stünde die IR-Kamera.

7 Temperaturen der MDT-Kammern

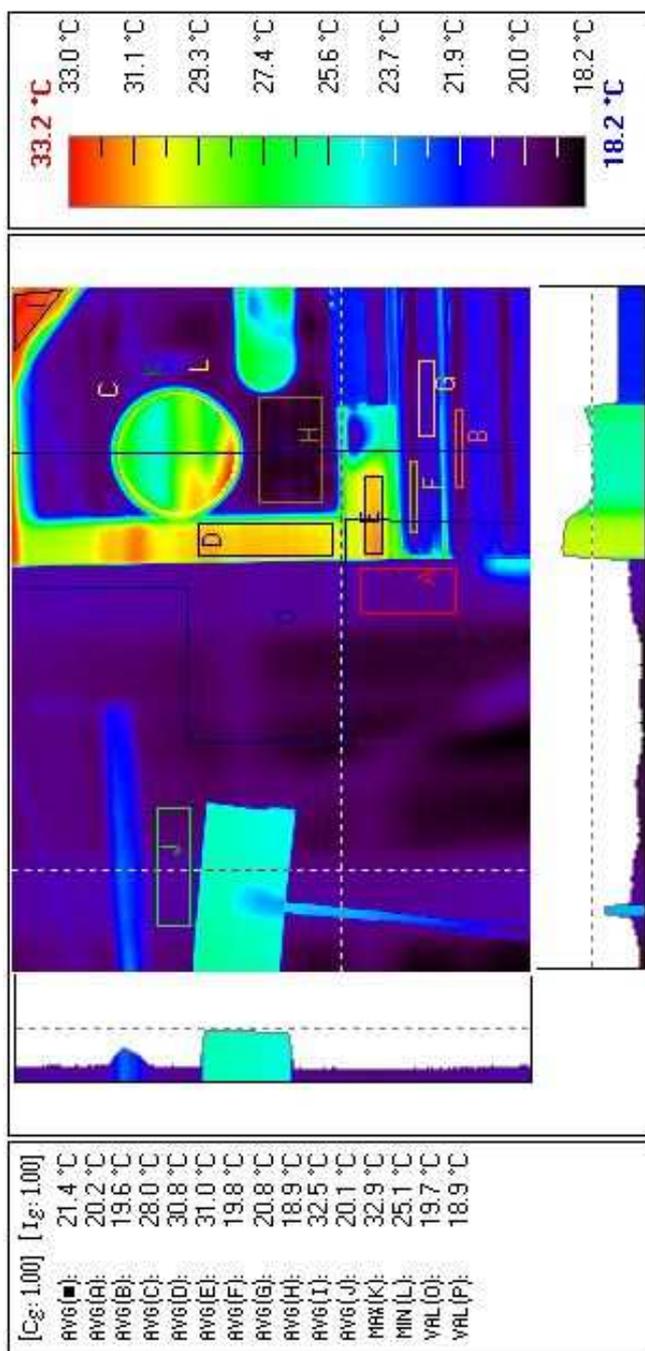


Abbildung 7.6: IR-Aufnahme des Aufbaus. Die gekennzeichneten Flächen B und G, J, D und H sowie C lieferten die Temperaturmittelwerte für die weiter unten angefügten Diagramme. G heißester, B kältester Rohrlagenbereich, J Fläche auf der Aluplatte, D und H sind Flächen auf dem Longbar, C umfasst die runde Öffnung im Longbar. D ist im übrigen die Reflexion von weiter mittig emittierter Strahlung, welche von der angebrachten Aluplatte auf den Longbar zurückgeworfen wurde.

7.1 Die Struktur der Rohrlagen und die Öffnung im Longbar

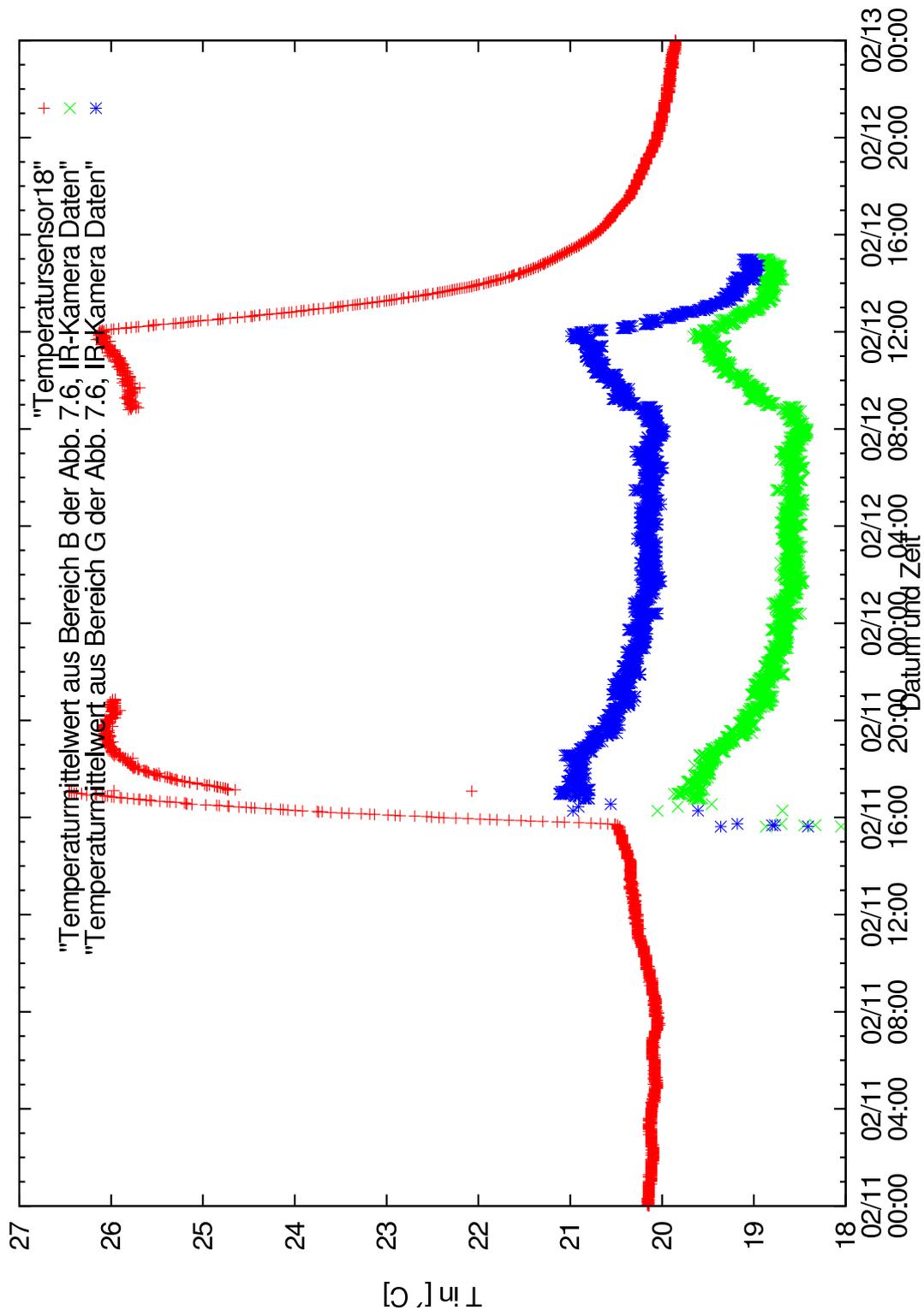


Abbildung 7.7: Plot des Temperatursensors der Rohrlagen gegen die heißeste (G) und kälteste Stelle (B). Die heißeste Stelle G lag im Bereich des „Luftkeils“ auf der Rohrlage.

7 Temperaturen der MDT-Kammern

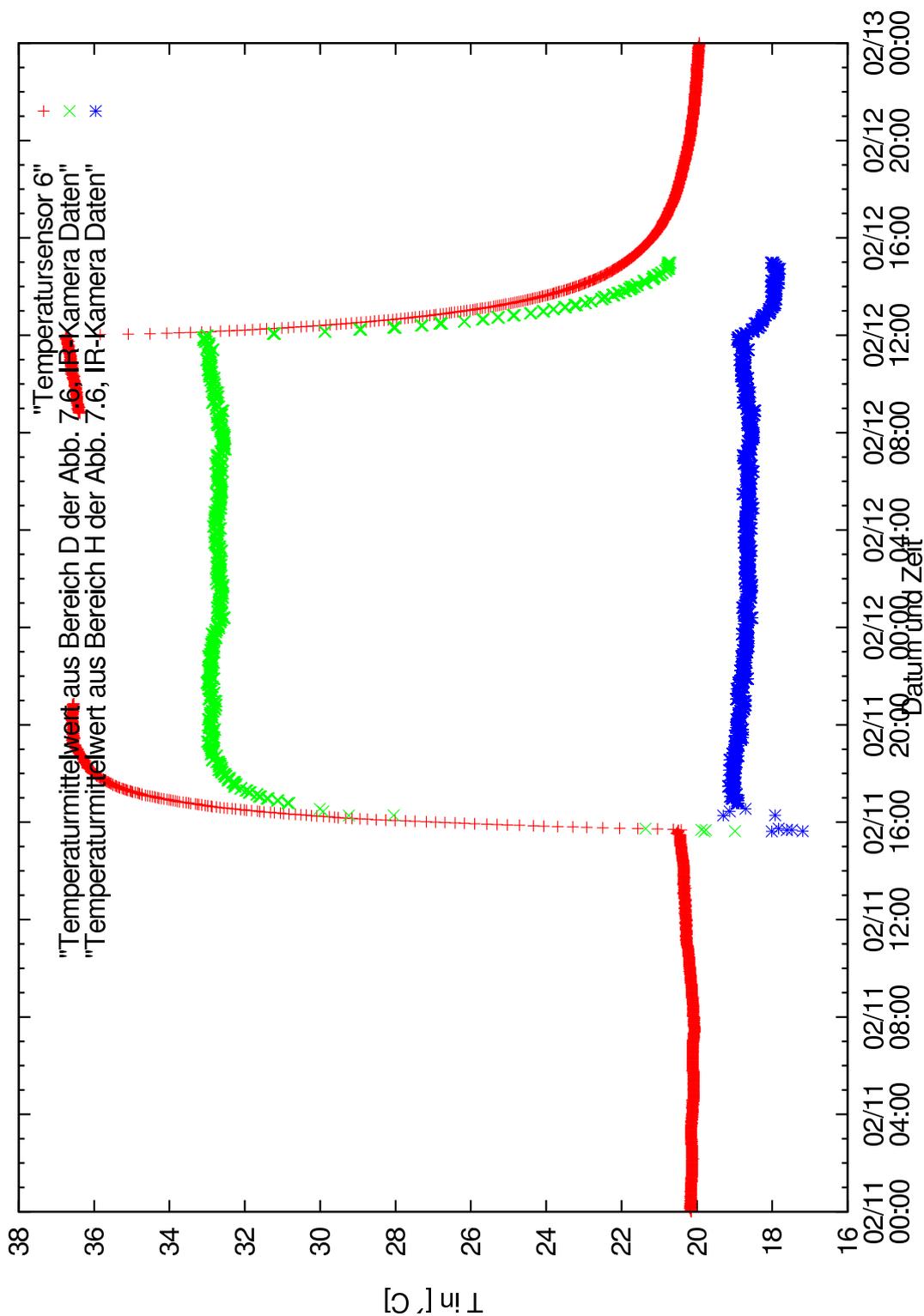


Abbildung 7.8: Plot des Temperatursensors des Longbars gegen den heißesten Bereich D und kühlfsten Bereich H. Im Bereich D treffen die Reflexionen aus dem Kammerinnern auf.

7.1 Die Struktur der Rohrlagen und die Öffnung im Longbar

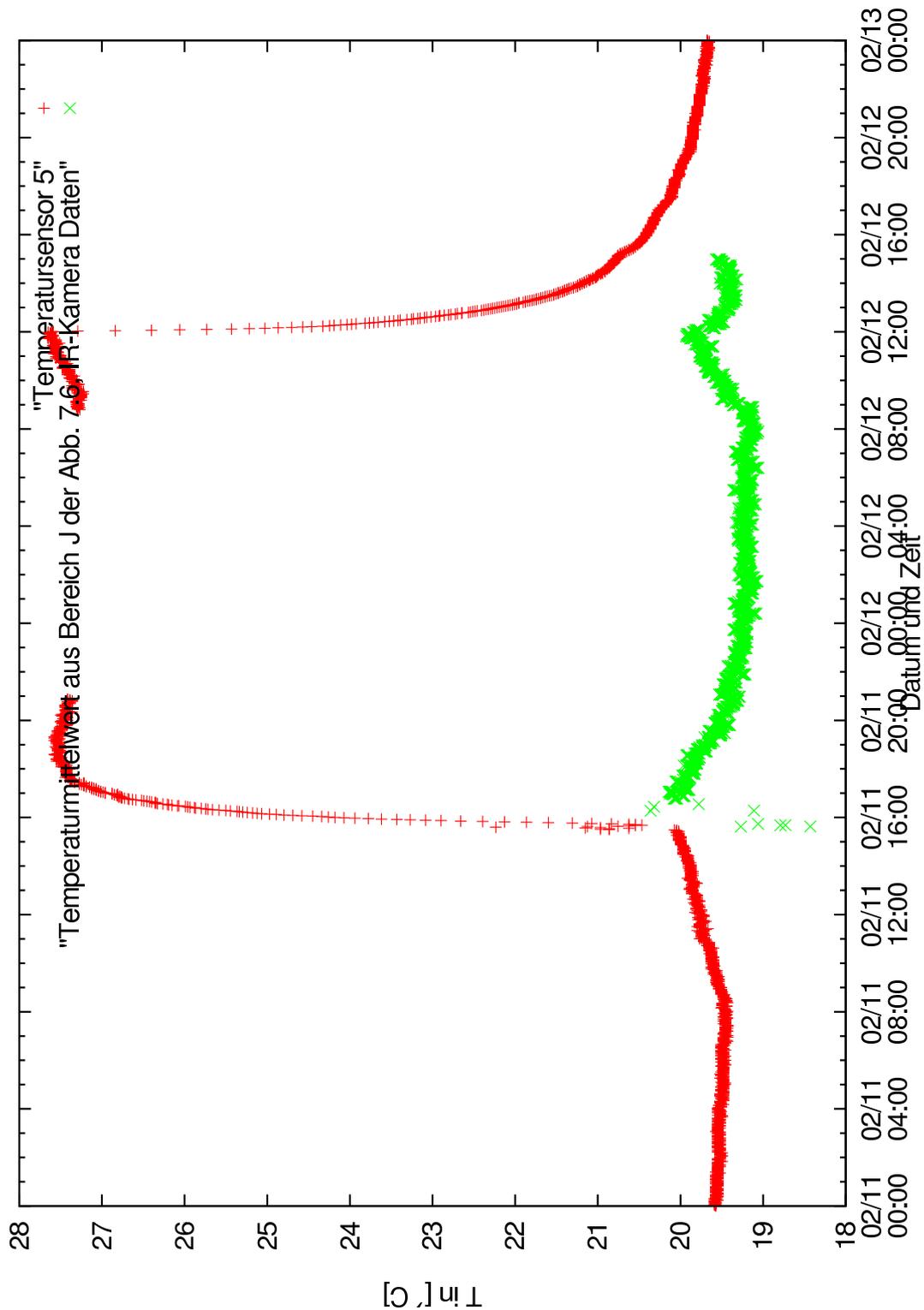


Abbildung 7.9: Plot des Temperatursensors der zusätzlich angebrachten Aluplatte gegen den Temperaturbereich J von Abb. 7.6.

7 Temperaturen der MDT-Kammern

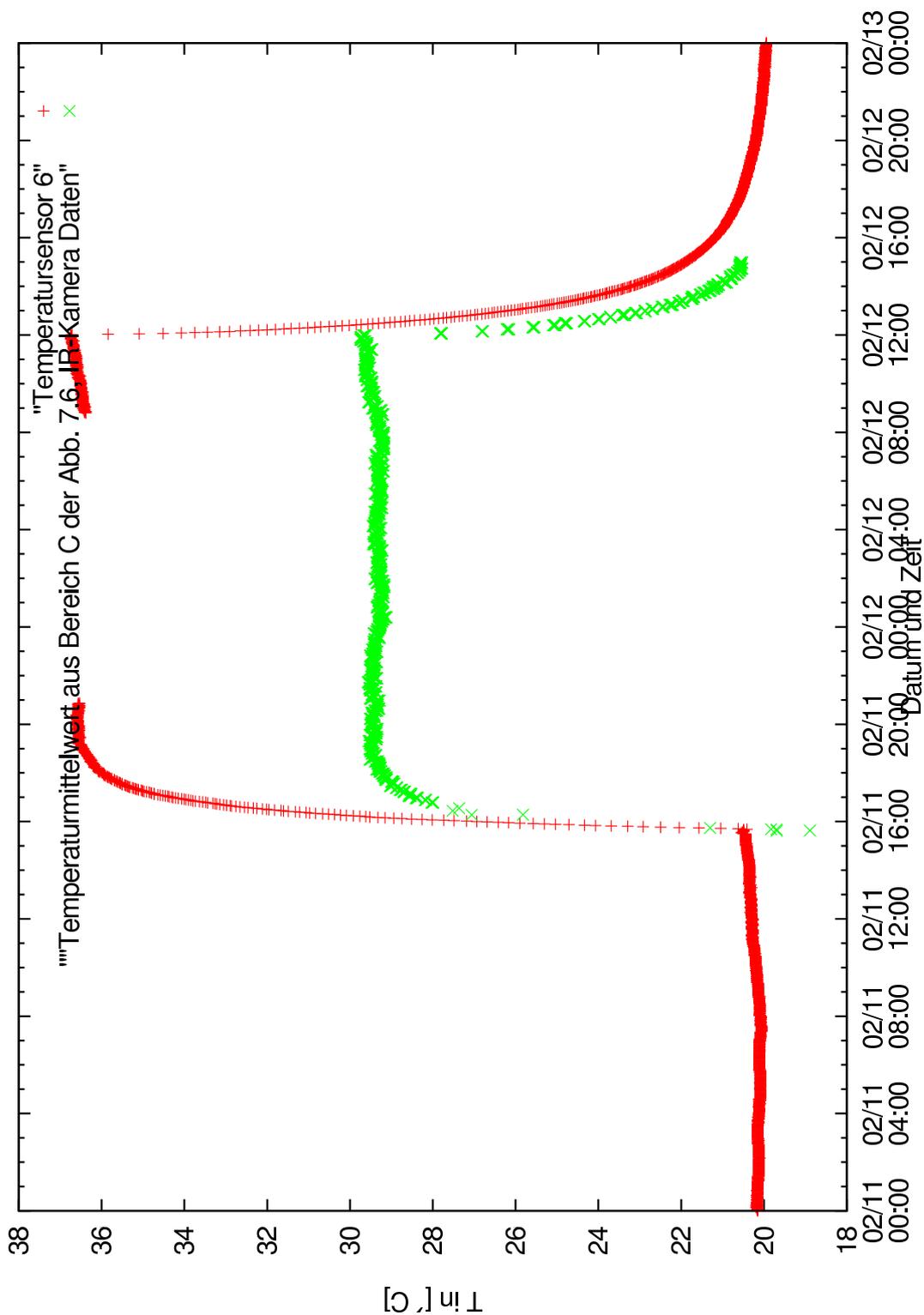


Abbildung 7.10: Plot des Temperatursensors des Longbars gegen den Temperaturmittelwert der runden Öffnung im Longbar (Bereich C).

7.1 Die Struktur der Rohrlagen und die Öffnung im Longbar

Der Plot in 7.8 zeigt eigentlich recht anschaulich, wie schwierig es sein kann, die eigentliche Information (Bereich H) aus den durch Reflexionen überlagerten Daten (Bereich D) zu gewinnen.

Der Plot in 7.9 wurde erstellt um einen Vergleichswert zu erhalten. Verhalten sich die Rohrlagen wie gewöhnliches Aluminium? Sie tun es weitgehend. Aus den Daten ergibt sich ein $\epsilon_{\text{Aluplatte}} = 0,048 \pm 0,03$. Vermutlich ist es, falls ein Bereichsdifferenzverfahren der Aluröhren keinen Erfolg bringt, am sinnvollsten, über die Temperatur der kühlfsten und heißesten Stellen der Rohre zu mitteln, und daraus die dortige Temperatur zu bestimmen. Natürlich nur, falls sich darin keine offensichtlichen anderweitigen Licht/Wärmequellen (Lampen, Elektronik) spiegeln.

Der Plot in 7.10 zeigt den Temperaturverlauf des Longbarsensors mit der Durchschnittstemperatur im kreisrunden Loch des Longbars. Leider wirkt dieses nicht als schwarzer Strahler (dazu müsste die Tiefe des Lochs ca. das 8-fache des Kreisdurchmessers sein [30]). Allerdings lässt sich so der Emissionsgrad des Kreises berechnen, $\epsilon_{\text{Kreis}} = 0,57 \pm 0,02$. Damit kann man zukünftig die Temperatur einer Kammer berechnen.

Dass die Daten der Temperatursensoren (immer in rot) zeitlich unterbrochen sind, lag an einem Computerupgrade, welcher das automatische Schreiben der Temperatursensordaten in die entsprechende Datei unterband. Man stelle sich hier den Linieverlauf entsprechend des IR-Kameradatenverlaufs vor.

7 Temperaturen der MDT-Kammern

8 Temperaturbestimmungsmethoden fürs ATLAS Experiment

„Kunst ist schön. Macht aber viel Arbeit“

Karl Valentin

Aufgrund des geringen Emissionsgrades von Aluminium ist eine Bestimmung der Oberflächentemperatur der BOS-MDT-Kammern innerhalb des ATLAS Experimentes schwierig, wenn nicht Aufkleber oder andere nichtmetallische Bauteile die Messung genauer ermöglichen. Dieses Kapitel soll die Möglichkeiten für Messungen an den Protective Covers und ihre Fehler aufzeigen. Prinzipiell sind sämtliche Bestimmungsmethoden auf dem Stefan-Boltzmann-Gesetz aufgebaut, aber dies ist ja durch die Grundfragestellung so vorgegeben. Sämtliche Methoden sind mit Bezeichnungen versehen, die beschreiben, wie sie angewendet werden.

8.1 Die direkte Messmethode

Die direkte Messmethode ist sicherlich die einfachste. Im Prinzip muss man nichts weiter tun, als die Infrarot-Kamera auf die MDT-Kammern zu halten und abzulesen, welchen Temperaturwert T_M diese bei der Emissionsgradeinstellung $\epsilon_{\text{Kam}} = 1$ ausgibt. Da sich der Emissionsgrad von Aluminium zu einem Wert von $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054 \pm 0,02$ ergeben hat, und dieser nicht als Wert in der Kamera einzustellen ist, ist eine nachträgliche Umrechnung unumgänglich. Nach SBG in Kapitel 2.2 und 2.5 ergibt sich:

$$T_O = \left(\frac{T_M^4 - (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4}{\epsilon_{\text{Alu}}} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (8.1)$$

Als Fehler folgt ¹

$$\Delta T_O = \left(\frac{T_M^4 - (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^4}{\epsilon_{\text{Alu}}} \right)^{-\frac{3}{4}} \cdot \left[\left(\frac{T_M^3}{\epsilon_{\text{Alu}}} \right)^2 \cdot \Delta T_M^2 + \left(\frac{T_{\text{Um}}^4 - T_M^4}{4 \cdot \epsilon_{\text{Alu}}^2} \right)^2 \cdot \Delta \epsilon_{\text{Alu}}^2 + \left(\frac{T_{\text{Um}}^3 \cdot (\epsilon_{\text{Alu}} - 1)}{\epsilon_{\text{Alu}}} \right)^2 \cdot \Delta T_{\text{Um}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.2)$$

¹nach

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Delta x_i^2}$$

8 Temperaturbestimmungsmethoden für ATLAS

Wenn wir jetzt die unabhängige quadratische Fehlerrechnung, wie sie dort oben steht, genauer betrachten, indem wir im Labor erreichbare Werte einsetzen, so erreichen wir eine untere Fehlerabschätzung.

- $T_M = 21^\circ\text{C}$, $\Delta T_M = 0,05^\circ\text{C}$, bei $\epsilon_{\text{Kam}} = 1$
- $T_{\text{Um}} = 20^\circ\text{C}$, $\Delta T_{\text{Um}} = 0,1^\circ\text{C}$
- $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054$, $\Delta\epsilon_{\text{Alu}} = 0,02$
- ergibt ein $T_O = 37,0^\circ\text{C}$ mit Fehler $\Delta T_O = 6,0^\circ\text{C}$
- Hauptgrund des Fehlers in T_O ist der Fehler von 40% von ϵ_{Alu}

Wir erhalten einen Fehler von ca. 20% auf die Temperaturegebnisse in $^\circ\text{C}$.

8.2 Erwärmungs-Methode

Die Erwärmungs-Methode ist eine Differenzmethode zweier Messungen. Sie besteht darin, das Objekt durch eine unabhängige Quelle zu erhitzen, bei konstanter Hintergrundtemperatur T_{Um} . Die Erwärmungs-Methode ist für das Verständnis nicht unerheblich und soll hier näher betrachtet werden. Der springende Punkt dieser Methode ist, dass bei einer wohldefinierten Erwärmung aus einer externen Quelle, der Hintergrund (T_{Um}) aus der Rechnung herausfallen würde. Durch den Wegfall der Hintergrundtemperaturterme in unserer Gleichung wäre somit ein großes Problem der Messungen umgangen! An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Gesamtintensität, welche durch die Infrarotkamera gemessen wird, aufgrund des geringen Emissionsgrades von 5% zu ca. 95% von Hintergrund bestimmt wird! (Was sich ja auch mit den Ergebnissen der Doppel- und Einfachreflexionsmessung deckt, siehe Tabelle 6.1.)

Aus dem SBG mit Hintergrundstrahlung in Kapitel 2.2 folgt:

$$T_{M1}^4 = \epsilon_{\text{Alu}} \cdot (T_O)^4 + (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}1}^4 \quad (8.3)$$

Wobei T_{M1} die Temperatur ist, die zu Beginn des Experiments oder der Beobachtung mit der IR-Kamera bei $\epsilon_{\text{Kam}} = 1$ gemessen wird. $T_{\text{Um}1}$ ist (Hintergrund-, Umgebungs- oder) Reflexionstemperatur.

Wurde das Objekt um K erwärmt, ergibt sich für die 2. Messung:

$$T_{M2}^4 = \epsilon_{\text{Alu}} \cdot (T_O + K)^4 + (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}2}^4 \quad (8.4)$$

mit

$$T_{\text{Um}2} = T_{\text{Um}1} + d,$$

mit Hintergrundtemperaturvariation d .

Unter Vernachlässigung sämtlicher Terme mit $(K/T_O)^n$ und $(d/T_{Um})^n$, $n \geq 2$ ergibt sich nach Taylorentwicklung

$$T_{M2}^4 - T_{M1}^4 = 4\epsilon_{Alu} \cdot K \cdot T_O^3 + 4 \cdot (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot T_{Um1}^3 \cdot d, \quad (8.5)$$

daraus folgt umgestellt nach der Objekttemperatur

$$T_O = \left(\frac{T_{M2}^4 - T_{M1}^4 - 4 \cdot (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot T_{Um1}^3 \cdot d}{4 \cdot K \cdot \epsilon_{Alu}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (8.6)$$

Solch eine externe Erhitzungs-Quelle wäre am effektivsten, wenn sie die Oberflächenplasmonen von Aluminium bei 10,8 eV (Volumenplasmonen bei 15,3 eV) ansprechen könnte [42]. Da dies dem Wellenlängenbereich von Röntgenstrahlung entspricht, dürfte sie aber schwieriger umzusetzen zu sein. An der TU unter Dr. Andreas Ulrich wird gerade ein ähnliches Verfahren, allerdings mit einem 3µm-Laser erprobt, mit dem sie hoffen, eine beschichtete Folie zu erwärmen [43].

Als Fehlerrechnung zur Erwärmungs-Methode ergibt sich mit

$a = \frac{1}{3} [((T_{M2}^4 - T_{M1}^4) - (1 - \epsilon) \cdot 4 \cdot T_{Um1}^3 \cdot d) / (4 \cdot K \cdot \epsilon_{Alu})]^{-2/3}$ und $T_M^4 = T_{M2}^4 - T_{M1}^4$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta T_O = & \left[\left(\frac{a}{K \cdot \epsilon_{Alu}} \right)^2 \cdot [T_{M1}^6 \cdot (\Delta T_{M1})^2 + T_{M2}^6 \cdot (\Delta T_{M2})^2 + \left(\frac{T_{Um1}^3 \cdot d - \frac{1}{4} T_M^4}{\epsilon_{Alu}} \right)^2 \cdot (\Delta \epsilon_{Alu})^2 \right. \\ & + (3 \cdot (1 - \epsilon_{Alu}) T_{Um1}^2 \cdot d)^2 \cdot (\Delta T_{Um1})^2 + ((1 - \epsilon_{Alu}) T_{Um1}^3)^2 \cdot (\Delta d)^2 \\ & \left. + \left(\frac{\frac{1}{4} T_M^4 - (1 - \epsilon_{Alu}) T_{Um1}^3 \cdot d}{K} \right)^2 (\Delta K)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (8.7)$$

Wenn wir hier wieder Temperaturwerte und Fehler einsetzen, so ergeben sich folgende Werte:

- Definierte Temperaturerhöhung $K = 10 \text{ K}$
- $T_{M1} = 21,0^\circ\text{C}$, $\Delta T_{M1} = 0,05^\circ\text{C}$ bei $\epsilon_{Kam} = 1$
- $T_{M2} = 21,6^\circ\text{C}$, $\Delta T_{M2} = 0,05^\circ\text{C}$ bei $\epsilon_{Kam} = 1$
- $d = 0,2^\circ\text{C}$
- $\epsilon_{Alu} = 0,054$, $\Delta \epsilon_{Alu} = 0,02$
- ergibt ein $T_O = 31,8^\circ\text{C}$ mit Fehler $\Delta T_O = 43,8^\circ\text{C}$
- Hauptgrund des Fehlers in T_O ist wieder der Fehler des ϵ_{Alu} von 40%

In Ermangelung eines geeigneten Lasers und aufgrund der hohen Fehler erweist sich diese Methode als z. Zt. nicht durchführbar.

8.3 Objektemperaturbestimmung im zeitl. Verlauf

Wenn wir wissen, wie sich die Objekttemperatur zu einem gegebenen Anfangszeitpunkt verhält,² so ist es möglich die Differenz in der Erwärmung³ zu ermitteln.

Also greifen wir die Idee aus der indirekten Messung auf. Und rechnen wie oben, nur wird nach K , der Differenz der ersten Objekttemperatur T_{O1} auf die zweite (spätere) Temperatur T_{O2} , umgestellt.

$$K = \left(\frac{(T_{M2}^4 - T_{M1}^4) - 4 \cdot (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um1}}^3 \cdot d}{4 \cdot T_{\text{O}}^3 \cdot \epsilon_{\text{Alu}}} \right). \quad (8.8)$$

Dies ist ebenfalls eine gute Methode. Auch hier ist $\Delta\epsilon_{\text{Alu}}$ Hauptfehler. Wir wissen bereits, dass die Hintergrundtemperatur einen entscheidenden Faktor spielt, deshalb sollte auf sie gut geachtet werden.

- $T_{M1} = 21,0^\circ\text{C}, \Delta T_M = 0,05^\circ\text{C}$
- $T_{M2} = 21,6^\circ\text{C}, \Delta T_M = 0,05^\circ\text{C}$
- $d = 0,1, T_{\text{O}} = 20^\circ\text{C}$
- $T_{\text{Um}} = 20^\circ\text{C}, \Delta T_{\text{Um}} = 0,1^\circ\text{C}$
- $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054, \Delta\epsilon_{\text{Alu}} = 0,02$
- ergibt ein $K = 11,3 \text{ K}$ mit Fehler $\Delta K = 4,7 \text{ K}$
- Hauptgrund des Fehlers in K ist dann wieder $\Delta\epsilon_{\text{Alu}} = 0,02$
- Diese Methode lässt sich noch verbessern, indem wir nicht einen sondern zwei Messpunkte und dann deren Differenz zueinander betrachten. Dadurch wirkt sich der Fehler in d und ϵ nicht so stark aus.

Die Fehlerrechnung lautet folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \Delta K = \frac{1}{\epsilon_{\text{Alu}} T_{\text{O}}^3} & \cdot \left[(T_{M2}^3)^2 \cdot (\Delta T_{M2})^2 + (T_{M1}^3)^2 \cdot (\Delta T_{M1})^2 + (-3 \cdot d \cdot T_{\text{Um}}^2 (1 - \epsilon_{\text{Alu}}))^2 \cdot (\Delta T_{\text{Um}})^2 \right. \\ & + \left. (-T_{\text{Um}}^3 (1 - \epsilon_{\text{Alu}}))^2 \cdot (\Delta d)^2 \right. \\ & + \left. \left(\frac{3}{T_{\text{O}}} \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot (T_{M2}^4 - T_{M1}^4) - (1 - \epsilon_{\text{Alu}}) \cdot T_{\text{Um}}^3 \cdot d \right] \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{O}})^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{Alu}}} \cdot \left[\frac{1}{4} (T_{M2}^4 - T_{M1}^4) - T_{\text{Um}}^3 \cdot d \right] \right)^2 \cdot (\Delta\epsilon_{\text{Alu}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (8.9)$$

²Wenn zum Beispiel T_{O} vor Hochfahren des Detektors die Umgebungstemperatur angenommen hat.

³zum Beispiel durch Anfahren des Detektors

8.4 Welche Messung für welche Umstände

Die Herleitung zur Fehlerrechnung findet sich im Anhang C. Es ist immer empfehlenswert mehrere Punkte auf den Kammern zu betrachten. Zum einen kann ein bestimmter Punkt durch ungünstige Bedingungen fehlerhafte Information liefern, zum Beispiel wenn sich auf diesem eine entfernte Hitzequelle (Lampe) reflektiert.

Tabellen mit durchgerechneten Beispielen zu allen Methoden befinden sich im Anhang D

8.4 Welche Messung für welche Umstände

Generell gilt, dass die direkte Messung die am einfachsten durchzuführende ist. Dabei wäre es natürlich von erheblichen Vorteil, könnte man direkt den Hintergrund messen, spiegeln, ihn in Übereinstimmung (richtige Winkel, leicht abgeschwächt in der Information, da der Hintergrund im IR-Bild ja „nur“ rund 95% beträgt), also deckungsgleich mit dem gemachtem Thermographiebild bringen, und dann davon abziehen. Das ist keine leichte Prozedur, und Versuche hierzu waren bislang erfolglos. Solche Verfahren sind in der Astronomie gebräuchlich, so dass hier ein Ansatzpunkt gegeben ist, dieses Verfahren zu verbessern. Bis dahin ist das Prinzip, IR-Kamera auf das zu messende Objekt zu halten, die Information nach der Theorie in Kapitel 2.5 und in 8.1 umzurechnen, das Einfachste. Mehrere Punkte zu betrachten bringt Vorteile.

Die Messmethode mit dem zeitlichen Verlauf würde mehr Aufwand bedeuten. Sie würde letztendlich auf die Temperatursensoren oder Aufkleber oder Öffnungen in den Kammern (Loch in den Longbars etc.) zur Anfangstemperatur-Bestimmung zurückgreifen (wenn die Anfangstemperatur \neq Umgebungstemperatur ist). Es muss aber darauf geachtet werden, dass die Hintergrundtemperatur konstant gehalten wird. Letztendlich gilt auch hier: Wer mehr Punkte betrachtet, ist klar im Vorteil. Sie bietet sich an, wenn langwierige Messungen kein Problem darstellen und mehrere benachbarte Punkte im zeitlichen Verlauf erfasst werden können.

Beide Methoden sind für das ATLAS-Experiment geeignet. Letztendlich ist es eine Aufwandsfrage. Die direkte Methode ist, die Fehler betreffend, die bessere.

8 Temperaturbestimmungsmethoden für ATLAS

9 Zusammenfassung und Ausblick

„[...] schließt das Werk. Es sollte in keinem Bücherschrank fehlen.“
Loriot

Tabelle 9.1: Emissionsgradtabelle verschiedener in ATLAS verwendeter Materialien. * siehe Kapitel 7.1

Emissionsgrad von	ϵ
Prot. Cover (Alu)	$0,054 \pm 0,02$
Rohrlagen der MDT-Kammer (Alu) aus einer Langzeitmessung*	$0,11 \pm 0,04$
Rundes Loch in Longbar aus einer Langzeitmessung*	$0,57 \pm 0,02$
Kammernschonbezug	$0,91 \pm 0,02$
gelber Stahlträger des Cosmic Ray Messstands	$0,70 \pm 0,02$
LMU Aufkleber (groß)	$0,77 \pm 0,02$
MPI Aufkleber	$0,98 \pm 0,02$
MPI Plastikschild	$0,95 \pm 0,02$
Gaffertape silber (no-Name)	$0,79 \pm 0,02$
Schwarzes Isolierband (aus dem CERN-Laden) Blickdicht, zum Umwickeln der Szintillatoren	$0,99 \pm 0,02$
Isolierband schwarz (dehnb. PVC, Coroplast)	$0,94 \pm 0,02$
Isolierband grün (dehnb. PVC, Coroplast)	$0,92 \pm 0,02$
Paketband (no-Name, dt. Produktion) durchsichtig-braun	$0,59 \pm 0,02$

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit den Methoden zur berührungslosen Temperaturbestimmung von hochreflektierendem Aluminium. Diese wurde im Hinblick auf den möglichen Einsatz von Infrarotkameras im ATLAS-Experiment zur Detektion von „Hot Spots“ unternommen. Es wurden verschiedene Methoden entwickelt um den Emissionsgrad ϵ_{Alu} von gewalztem, hochreflektierendem Aluminium zu bestimmen. Ausführlich wurde gezeigt, dass sich der Emissionsgrad des Aluminiums für das Protective Cover zu $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054 \pm 0,02$ ergibt. Dies wurde mehrfach mit zwei Infrarotkameras, der FLUKE TI20 und der NEC-Sanei TH9100pro bestätigt. Die entsprechende Theorie (das Stefan-Boltzmann-Gesetz, SBG) wurde, auch in Bezug auf die Infrarotkameras, dargelegt und überprüft. Die Infrarotkameras arbeiten nach dem, um die

9 Zusammenfassung und Ausblick

Hintergrundstrahlung erweiterten, SBG (siehe Kapitel 2.2.) Der Emissionsgrad erwies sich als knapp signifikant ($\sigma = 1,5$) vom Winkel abhängig und steigt um 0,00055 pro Grad zur Normale an. Um Messfehler auszuschließen und um die Struktur der Aluminiumplatten des Protective Covers besser zu verstehen, wurden auch Oberflächenstudien der Aluminiumplatten getätigt. Diese belegen, dass durch die gewalzte Oberfläche die Temperaturmessung am Protective Cover nicht beeinflusst wird (siehe Kapitel 6.8), aber die entwickelte, deutlich empfindlichere Streuungsmessungsmethode (siehe Kapitel 6.11) durchaus. Der Streuungsanteil am Protective Cover ergibt sich zu ca. $2,6 \pm 1,1\%$ von der Gesamtintensität. Darüberhinaus zeigt eine Langzeitstudie, dass sich der Emissionsgrad der Aluminiumrohrlagen der MDT-Kammern zu $\epsilon_{\text{Alu}_{\text{gem}}} = 0,11 \pm 0,04$ ergibt. Auch andere, am ATLAS-Myon-Spektrometer verwendete Materialien, wurden untersucht. Es ergaben sich die in Tabelle 9.1 gezeigten Werte und Fehler. Darüber hinaus wurden Methoden aus dem erweiterten SBG abgeleitet, die zur Temperaturbestimmung im ATLAS-Experiment mit Hilfe einer Infrarotkamera geeignet sind. Zu diesen Temperatur-Bestimmungsmethoden wurden Fehlerrechnungen angefertigt, um ihre Genauigkeit abschätzen zu können. Als beste Methode, was sowohl Ausführbarkeit und Fehlergenauigkeit betrifft, ergab sich die Direkte Messmethode in Kapitel 8.1. Der Fehler dieser Methode beläuft sich auf 20% des daraus ermittelten T_{O} -Wertes, was direkt auf den hohen Fehler (40%) im ermittelten Emissionsgrad von Aluminium $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,054 \pm 0,02$ zurückzuführen ist. Sinnvoll wäre es, wenn man die Reflexion in den betrachteten Protective Covers während der Messung oder nachträglich eliminieren könnte. Dies könnte durch ein Verfahren zu bewältigen sein, dass auf die Bildbearbeitungsmethoden der in der Astronomie üblichen Verfahren zurückgreift. Auch kann man durch Messungen in der Art der Winkelabhängigkeitsmessung in Kapitel 6.6 die Fehler der Emissionsgradbestimmung weiter minimieren.

A Detektor der TH9100pro



Abbildung A.1: Koplettmodul des Detektors [33]

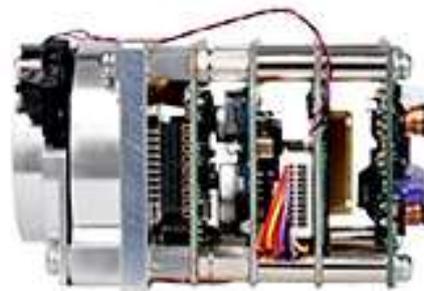


Abbildung A.2: Seitliche Ansicht des Koplettmoduls des Detektors [33]

HX0830

Array format
320x240 pixels



Basic characteristics

Detector type	Uncooled microbolometer
Array format (HxV)	320x240 pixels
Operability	>98%
Pixel size (HxV)	23.5 μ m x 23.5 μ m
Fill factor	92%
Thermal time constant	16msec
Frame rate	60Hz
Wavelength	8~14 μ m
NETD	<75mK (F/1, 60Hz)
Weight	26g

Abbildung A.3: Ansicht und Daten des HX0830-Detektors [33].

A Detektor der TH9100pro

Module package dimensions (Unit:mm)

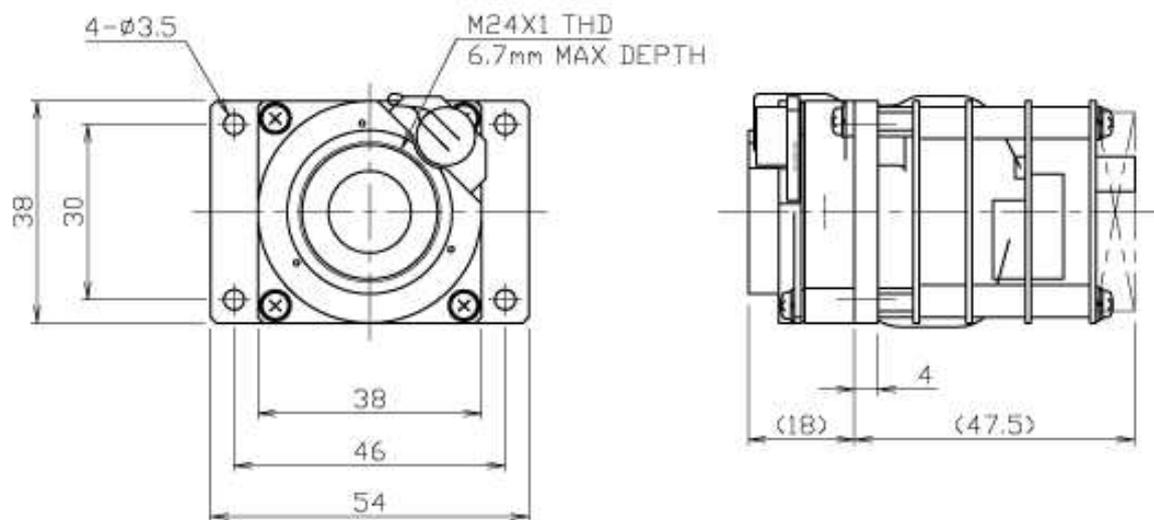


Abbildung A.4: Schemaansicht des Koppeltmoduls des Detektors [33].

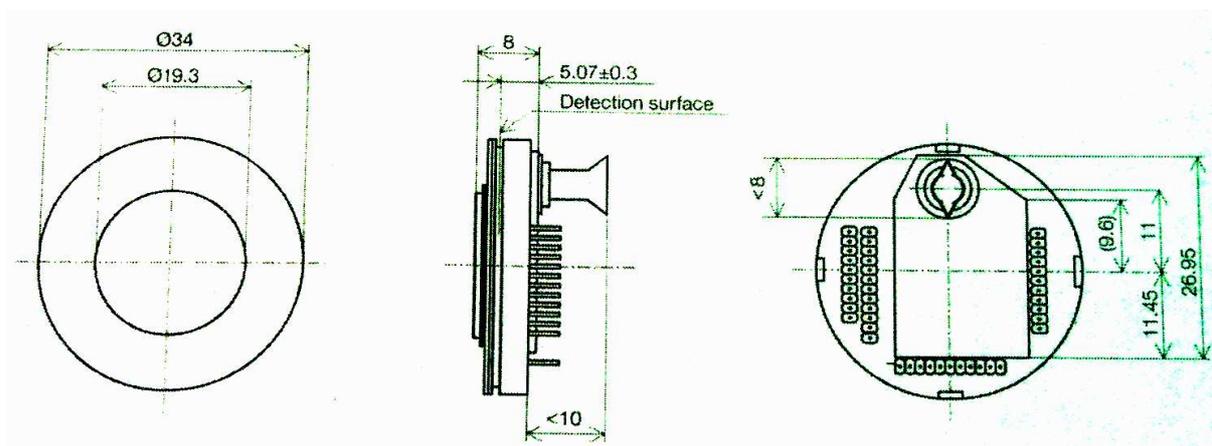


Abbildung A.5: Daten des NEC-TH9100pro Detektors [33], Angaben in [mm].

B Erste Emissionsgradmessung

B.1 Erste Emissionsgradmessung

zu Kapitel 6.4

Als allererste Emissionsgradbestimmung wurden die Werte eines Drehungsexperiments wie in Kapitel 6.8 beschrieben, benutzt. Diese Methode der Emissionsgradbestimmung wurde indirekt durchgeführt wie in 2.4 beschrieben.

Im Gegensatz zum oben genannten Drehmessungsexperiment wurde dieses mit aufrechtstehendem Dewar durchgeführt. Die Problematik hierbei besteht darin, dass wenn das Gefäß aufrecht steht, das eingefüllte Wasser und dessen Oberfläche betrachtet wird, und nicht, wie später, die mehrfach an den Spiegelflächen des Dewars reflektierten Hohlraumstrahlen. Aufgrund dieser Tatsache wurde die spätere Drehmessung durchgeführt. Zur Abschätzung des ersten Emissionsgrades wurde allerdings die frühere Messung herangezogen. Nach Kapitel 2.4 ergab sich dieser Messung zufolge ein Emissionsgrad von $\epsilon_{\text{Alu}} = 0,239$. Dieses widersprach sämtlichen nachfolgenden Emissionsgradmessungen um mehr als eine halbe Größenordnung. Zunächst wurde vermutet, dass aufgrund der Methode der indirekten Bestimmung die grobe Abweichung zur direkten Methode durch zusätzliche Streuung verursacht würde. Dies führte dazu, dass Streuung an den Protective Covers näher untersucht wurde. In Kapitel 6.10 nachzulesen. Auch wurde vermutet, dass der Transmissionsgrad von Wasserdampf einen Einfluss haben könnte. Allerdings wurde dieser berechnet und ergab sich hierfür zu $\tau = 1$ (s. u.).

Trotz sorgfältigem Studium der Problematik konnte aber nicht in Erfahrung gebracht werden, welche systematischen Fehler zu dieser großen Abweichung geführt haben.

B.2 Berechnung des Transmissionsgrads von Wasserdampf $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$

Warum es sich nicht um den Einfluss von Wasserdampf im Hohlraumstrahler gehandelt haben kann, zeigt folgende kurze Rechnung:

B Erste Emissionsgradmessung

$$\text{Mit } w = \varphi_d \cdot Q_d \cdot d \quad (1)$$

φ_d : % der Luftfeuchte

Q_d : Dampfdruck sättigung

d : Übertragungsgestrecke

Q_d ist Temperaturabhängig:

$$T_s \text{ in } ^\circ\text{C} : 70 \quad [A]$$

$$Q_d \text{ in } \frac{\text{mm}}{\text{km}} \left(\hat{=} \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) : 137$$

Es ergibt sich: $(\varphi_d = 100\%, Q_d = 137 \frac{\text{mm}}{\text{km}}; d = 3\text{cm})$

$$w = 100\% \cdot 137 \frac{\text{mm}}{\text{km}} \cdot 3 \cdot 10^{-5} \text{ km} \approx 600 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

$$\approx 10^{-2} \text{ mm}$$

$$\text{und } \tau_{\text{H}_2\text{O}}(w) = (\tau_{\text{H}_2\text{O}}^{w_0})^{w/w_0} \quad (2)$$

wobei w_0 wellenlängenabhängig

Für $\lambda_1 - \lambda_2$: 80 - 14,0 μm gilt

Für $w_0 = 1 \text{ mm}$: $\tau_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,98$ für 1 mm (kleinster zu findender Wert)

Schlimmstenfalls (mindestens):

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(w) = 0,98^{0,01} = 1$$

Wir haben also eine Transmission für Wasserdampf von $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = 1$. D.h. es spielt keine Rolle in unseren Messungen.

Formeln (1), (2) und Werte [A] und [B] stammen aus N. Schuster u. V. Kolobrodov Infrarotthermographie, Wiley-VCH 2004

Abbildung B.1: Berechnung des Transmissionsgrads von Wasserdampf $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ in der Luft bei 70°C nach [13] mit viel Dampf.

C Fehlerrechnung zu T_O und K

zu Kapitel 8.2 und 8.3

$$T_{M1}^4 = \epsilon_{Alu} \cdot (T_O)^4 + (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot T_{Um1}^4 \quad (C.1)$$

$$T_{M2}^4 = \epsilon_{Alu} \cdot (T_O + K)^4 + (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot T_{Um2}^4 \quad (C.2)$$

$$= \epsilon_{Alu} \cdot (T_O^4 + 4T_O^3 \cdot K + 6T_O^2 \cdot K^2 + 4T_O \cdot K^3 + K^4) + (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot T_{Um2}^4 \quad (C.3)$$

mit

$$T_{Um2} = T_{Um1} + d$$

ist

$$T_{M2}^4 - T_{M1}^4 = \epsilon_{Alu} \cdot (4T_O^3 \cdot K + 6T_O^2 \cdot K^2 + 4T_O \cdot K^3 + K^4) + (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot ((T_{Um1} + d)^4 - T_{Um1}^4) \quad (C.4)$$

mit Vernachlässigung der Terme von K^n , $n \geq 2$ ergibt sich:

$$T_{M2}^4 - T_{M1}^4 = \epsilon_{Alu} \cdot (4T_O^3 \cdot K) + (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot (4T_{Um1}^3 \cdot d + 6T_{Um1}^2 \cdot d^2 + 4T_{Um1} \cdot d^3 + d^4) \quad (C.5)$$

mit Vernachlässigung der Terme von d^n , $n \geq 2$ ergibt sich:

$$T_{M2}^4 - T_{M1}^4 = \epsilon_{Alu} \cdot 4T_O^3 \cdot K + (1 - \epsilon_{Alu}) \cdot 4T_{Um1}^3 \cdot d \quad (C.6)$$

$$\Rightarrow T_O = \left(\frac{[(T_{M2}^4 - T_{M1}^4) - (1 - \epsilon_{Alu})4T_{Um1}^3 \cdot d]}{4K\epsilon_{Alu}} \right)^{1/3} \quad (C.7)$$

Als Fehlerrechnung zur Erwärmungs-Methode, mit quadratisch-unabhängiger Fehlerfortpflanzung (nach Gauß) folgt, mit:

$a = \frac{1}{3} [((T_{M2}^4 - T_{M1}^4) - (1 - \epsilon) \cdot 4 \cdot T_{Um1}^3 \cdot d) / (4 \cdot K \cdot \epsilon_{Alu})]^{-2/3}$ und $T_M^4 = T_{M2}^4 - T_{M1}^4$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta T_O &= \left[(a \cdot 4T_{M2}^3 / 4K\epsilon_{Alu})^2 \cdot (\Delta T_{M2})^2 + (a \cdot 4T_{M1}^3 / 4K\epsilon_{Alu})^2 \cdot (\Delta T_{M1})^2 \right. \\ &+ \left(a \cdot \left(\frac{4 \cdot T_{Um1}^3 \cdot 4 \cdot d \cdot K \cdot \epsilon_{Alu} - [T_M^4 - (1 - \epsilon_{Alu})4 \cdot T_{Um1}^3 \cdot d]4 \cdot K}{16 \cdot K^2 \cdot \epsilon_{Alu}^2} \right) \right)^2 \cdot (\Delta \epsilon_{Alu})^2 \\ &+ ((a \cdot 3 \cdot 4(1 - \epsilon_{Alu}) \cdot T_{Um1}^2 d / 4K\epsilon_{Alu})^2 \cdot (\Delta T_{Um1})^2 \\ &+ ((a \cdot 4(1 - \epsilon_{Alu}) \cdot T_{Um1}^3 / 4K\epsilon_{Alu})^2 \cdot (\Delta d)^2 \\ &+ (a \cdot [T_M^4 - (1 - \epsilon_{Alu})4T_{Um1}^3 d] / 4K^2 \epsilon_{Alu})^2 \cdot (\Delta K)^2 \Big]^{1/2} \end{aligned}$$

C Fehlerrechnung zu T_O und K

\Leftrightarrow

$$\begin{aligned}
 \Delta T_O = & \left[\left(\frac{a}{K \cdot \varepsilon_{\text{Alu}}} \right)^2 \cdot [T_{\text{M1}}^6 \cdot (\Delta T_{\text{M1}})^2 + T_{\text{M2}}^6 \cdot (\Delta T_{\text{M2}})^2 + \left(\frac{T_{\text{Um1}}^3 \cdot d - \frac{1}{4} T_{\text{M}}^4}{\varepsilon_{\text{Alu}}} \right)^2 \cdot (\Delta \varepsilon_{\text{Alu}})^2 \right. \\
 & + (3 \cdot (1 - \varepsilon_{\text{Alu}}) T_{\text{Um1}}^2 \cdot d)^2 \cdot (\Delta T_{\text{Um1}})^2 + ((1 - \varepsilon_{\text{Alu}}) T_{\text{Um1}}^3)^2 \cdot (\Delta d)^2 \\
 & \left. + \left(\frac{\frac{1}{4} T_{\text{M}}^4 - (1 - \varepsilon_{\text{Alu}}) T_{\text{Um1}}^3 \cdot d}{K} \right)^2 (\Delta K)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.8})
 \end{aligned}$$

$$T_{M_1}^4 = \varepsilon T_0^4 + (1-\varepsilon) T_u^4$$

$$T_{M_2}^4 = \varepsilon (T_0 + k)^4 + (1-\varepsilon) (T_u + d)^4$$

KS

$$T_{M_1}^4 - T_{M_2}^4 = 4 \varepsilon T_0^3 k + (1-\varepsilon) 4 T_u^3 d$$

$$k = \frac{(T_{M_1}^4 - T_{M_2}^4) - (1-\varepsilon) 4 T_u^3 d}{4 \varepsilon T_0^3}$$

Fehler in k:

$$\Delta k = \left[\left(\frac{T_{M_2}^3}{\varepsilon T_0^3} \right)^2 \Delta T_{M_2}^2 + \left(\frac{T_{M_1}^3}{\varepsilon T_0^3} \right)^2 \Delta T_{M_1}^2 + \left(\frac{-3d T_u^2 (1-\varepsilon)}{\varepsilon T_0^3} \right)^2 \Delta T_u^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{-T_u^3 (1-\varepsilon)}{\varepsilon T_0^3} \right)^2 \Delta d^2 + \left(3 \cdot \frac{\frac{1}{4} (T_{M_2}^4 - T_{M_1}^4) - (1-\varepsilon) T_u^3 d}{\varepsilon T_0^4} \right)^2 \Delta T_0^2 \right. \\ \left. + \Delta \varepsilon^2 \left(\frac{\frac{1}{4} (T_{M_2}^4 - T_{M_1}^4) - T_u^3 d}{\varepsilon^2 T_0^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$\left[\left(\frac{T_{M_2}^3}{\varepsilon T_0^3} \right)^2 \Delta T_{M_2}^2 + \left(\frac{T_{M_1}^3}{\varepsilon T_0^3} \right)^2 \Delta T_{M_1}^2 + \left(\frac{-3d T_u^2 (1-\varepsilon)}{\varepsilon T_0^3} \right)^2 \Delta T_u^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{-T_u^3 (1-\varepsilon)}{\varepsilon T_0^3} \right)^2 \Delta d^2 + \left(\frac{3}{T_0} \cdot \left(\frac{1}{4} (T_{M_2}^4 - T_{M_1}^4) - (1-\varepsilon) T_u^3 d \right) \right)^2 \Delta T_0^2 \right. \\ \left. + \Delta \varepsilon^2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{1}{4} (T_{M_2}^4 - T_{M_1}^4) - T_u^3 d \right) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\varepsilon T_0^3}$$

Abbildung C.1: Fehler zu Kapitel 8.3. Es stimmen die Indizes mit den im Kapitel verwendeten ein.

C Fehlerrechnung zu T_O und K

**D Tabellen zur Fehlerabschätzung der Direkt-,
Differenz- und Erwärmungsmethode zu
Kapitel 8**

D Tabellen zur Fehlerabschätzung zu Kapitel 8

Tabelle D.1: Tabelle zur Abschätzung der Fehler der Direktmethode aus Kapitel 8.1

T_{Um} °C	T_{Um}	ΔT_{Um}	T_M °C	T_M	ΔT_M	$\epsilon_{Alu} \pm \Delta \epsilon_{Alu}$
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	$0,054 \pm 0,02$
20	293,16	0,1	22	295,16	0,05	$0,054 \pm 0,02$
20	293,16	0,1	23	296,16	0,05	$0,054 \pm 0,02$
20	293,16	0,1	24	297,16	0,05	$0,054 \pm 0,02$
20	293,16	0,1	25	298,16	0,05	$0,054 \pm 0,02$
20	293,16	0,1	26	299,16	0,05	$0,054 \pm 0,02$
T_0 °C	T_0	ΔT_0	Faktor	(ΔT_M)	$(\Delta \epsilon_{Alu})$	(ΔT_{Um})
37,06	310,22	6,05	1,12E-015	5,55E+014	3,02E+016	1,95E+015
51,84	325	10,28	8,49E-016	5,67E+014	1,22E+017	1,95E+015
64,97	338,13	13,68	6,69E-016	5,79E+014	2,77E+017	1,95E+015
76,84	350	16,5	5,44E-016	5,90E+014	4,98E+017	1,95E+015
87,71	360,87	18,89	4,53E-016	6,02E+014	7,86E+017	1,95E+015
97,78	370,94	20,97	3,84E-016	6,15E+014	1,14E+018	1,95E+015

Tabelle D.2: Tabelle zur Abschätzung der Fehler zur Erwärmungsmethode aus Kapitel 8.2.

T_{Um} °C	T_{Um}	ΔT_{Um}	T_{M1} °C	T_{M1}	ΔT_{M1}	T_{M2} °C	T_{M2}	ΔT_{M2}	ϵ_{Alu}	$\Delta \epsilon_{Alu}$
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	21,6	294,76	0,05	0,054	0,02
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	22,6	295,76	0,05	0,054	0,02
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	23,6	296,76	0,05	0,054	0,02
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	24,6	297,76	0,05	0,054	0,02
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	25,6	298,76	0,05	0,054	0,02
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	26,6	299,76	0,05	0,054	0,02
$K \pm \Delta K$	Δd	T_0 °C	T_0	ΔT_0	Faktor	(ΔT_{M1})	(ΔT_{M2})	$(\Delta \epsilon_{Alu})$	(Δk)	(Δd)
10,00 ± 1,00	0,10	31,83	304,99	43,76	4,40E-011	1,62E+012	1,64E+012	3,22E+013	2,35E+012	5,68E+012
10,00 ± 1,00	0,10	150,49	423,65	55,15	1,18E-011	1,62E+012	1,67E+012	2,31E+014	1,69E+013	5,68E+012
10,00 ± 1,00	0,10	225,76	498,92	64,23	6,15E-012	1,62E+012	1,71E+012	6,17E+014	4,50E+013	5,68E+012
10,00 ± 1,00	0,10	283,86	557,02	71,48	3,96E-012	1,62E+012	1,74E+012	1,19E+015	8,71E+013	5,68E+012
10,00 ± 1,00	0,10	332,31	605,47	77,59	2,84E-012	1,62E+012	1,78E+012	1,97E+015	1,44E+014	5,68E+012
10,00 ± 1,00	0,10	374,44	647,6	82,93	2,17E-012	1,62E+012	1,81E+012	2,95E+015	2,15E+014	5,68E+012

Tabelle D.3: Tabelle zur Abschätzung der Fehler zur Objektmethode im zeitlichen Verlauf aus Kapitel 8.3

$T_{Um}^{\circ C}$	T_{Um}	ΔT_{Um}	$T_{M1}^{\circ C}$	T_{M1}	ΔT_{M1}	$T_{M2}^{\circ C}$	T_{M2}	ΔT_{M2}	$\epsilon_{\Delta Tu}$	$\epsilon_{\Delta Tu} \pm \Delta \epsilon_{\Delta Tu}$	$T_0 \pm \Delta T_0$
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	21,6	294,76	0,05	0,054±0,02	0,054±0,02	293,16±1,00
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	22,6	295,76	0,05	0,054±0,02	0,054±0,02	293,16±1,00
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	23,6	296,76	0,05	0,054±0,02	0,054±0,02	293,16±1,00
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	24,6	297,76	0,05	0,054±0,02	0,054±0,02	293,16±1,00
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	25,6	298,76	0,05	0,054±0,02	0,054±0,02	293,16±1,00
20	293,16	0,1	21	294,16	0,05	26,6	299,76	0,05	0,054±0,02	0,054±0,02	293,16±1,00
d	Δd	K	ΔK	Faktor a	(ΔT_{Um})	(ΔT_{M1})	(ΔT_{M2})	($\Delta \epsilon_{\Delta Tu}$)	(ΔT_0)	(Δd)	
0,00	0,10	11,26	4,72	5,40E-013	0,00E+000	1,62E+012	1,64E+012	3,22E+013	2,46E+010	5,68E+012	
0,00	0,10	30,18	11,4	5,40E-013	0,00E+000	1,62E+012	1,67E+012	2,31E+014	1,77E+011	5,68E+012	
0,00	0,10	49,29	18,4	5,40E-013	0,00E+000	1,62E+012	1,71E+012	6,17E+014	4,71E+011	5,68E+012	
0,00	0,10	68,6	25,51	5,40E-013	0,00E+000	1,62E+012	1,74E+012	1,19E+015	9,12E+011	5,68E+012	
0,00	0,10	88,1	32,72	5,40E-013	0,00E+000	1,62E+012	1,78E+012	1,97E+015	1,50E+012	5,68E+012	
0,00	0,10	107,8	40	5,40E-013	0,00E+000	1,62E+012	1,81E+012	2,95E+015	2,25E+012	5,68E+012	

Literaturverzeichnis

- [1] D. J. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, John Wiley & Sons Ltd, 1987
- [2] H. van der Graaf, H. Groenstege, F. Linde, P. Rewiersma, *RasNiK, an Alignment System for the ATLAS MDT Barrel Muon Chambers, Technical System Description*, Amsterdam, 2000
URL: http://www.nikhef.nl/pub/departments/et/experiments/atlas/rasnik/atlas_rasnik/rasnik_rev2.pdf
- [3] A. Mlynek, *Ortsauflösung der Driftrohre des ATLAS-Myonspektrometers bei Neutronenuntergrund, Diplomarbeit*, LMU München, 2006
- [4] ATLAS Collaboration, *ATLAS-Detector and Physics Performance Technical Design Report*, CERN/LHC/99-14, 1999
- [5] F. Sauli, *Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers*, CERN Report 77-09, 1977
- [6] F. Rauscher, *Test von Driftkammern mit kosmischen Myonen: Bau der ersten Ausbaustufe des Teleskops und Untersuchung seiner Leistungsfähigkeit, Diplomarbeit*, LMU München, 2001
- [7] F. Rauscher, *Untersuchung des Verhaltens von Driftrohren bei starken Gamma-Bestrahlung sowie Vermessung von Driftrohrkammern mit Hilfe von Myonen der kosmischen Höhenstrahlung, Dissertation*, LMU München, 2005
- [8] A. Müller, *The 2D CFD study of the thermal behaviour of the ATLAS Muon chambers and the cavern*, CERN, 2004
URL: <https://edms.cern.ch/document/592555/2>
- [9] A. Engl, *Temperaturstudien an ATLAS-MDT-Myondetektoren, Diplomarbeit*, LMU München, 2007
- [10] A. Müller, *Recent CFD Simulations of Thermal Environment in ATLAS*, CERN, 2004
URL: <https://edms.cern.ch/file/790995/1/CFD-2004-09-PP.pdf>
- [11] A. Müller, *ATLAS_Muon_animation.avi*, CERN, 2004
URL: <https://edms.cern.ch/document/592555/2>
- [12] Gigahertz Optik Internetpräsenz,
URL: http://www.gigahertz-optik.de/database_de/media/tutorial/III/II_2.jpg
- [13] N. Schuster und V. Kolobrodov, *Infrarotthermographie* WILEY-VCH, 2004

Literaturverzeichnis

- [14] M. Schlessinger, *Infrared technology fundamentals*, Marcel Dekker Inc., 1995
- [15] G. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*, JCD, Spie, 1998
- [16] C. Gerthsen und H. Vogel, *Gerthsen Physik*, 19. Auflage, Springer, 1997
- [17] Wikipedia, die freie Enzyklopädie, *Infrarotstrahlung*
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotstrahlung>
- [18] Bauphysik & Solarenergie, *Labor für bauphysikalische Messungen und Materialuntersuchungen*, Universität Siegen, 2003
URL: <http://nesa1.uni-siegen.de/messlab/optik1.htm>
- [19] H.D. Baehr und K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, Springer-Verlag, Berlin 2004
- [20] D. Karstädt, K. Möllmann, F. Pinno und M. Vollmer, *Sehen im Infrarot*, Physik in unserer Zeit, 29. Jhrg. 1998
- [21] H. Nothaft und G. Hofmann, *Hochauflösende lineare Infrarot-Array-Module (LINAR)*, Infobörse VDI/VDE, 2003
- [22] Wikipedia, die freie Enzyklopädie, *Microbolometer*
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Microbolometer>
- [23] N. Butler, R. Blackwell, R. Murphy, R. Silva, C. Marshall, *Low cost uncooled microbolometer imaging system or dual use SPIE Infrared Technology XXI*, Vol.2552, 1995
- [24] Wikipedia, die freie Enzyklopädie, *Infrared Detector*
URL: http://de.wikipedia.org/wiki/infrared_detector
- [25] LOT-Oriel Gruppe, *Eigenschaften optischer Materialien*, lot-oriel
URL: http://lot-oriel.com/site/site_down/tt-opticalmaterials_dede01.pdf
- [26] Wikipedia, die freie Enzyklopädie, *Thermographie*
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Thermografie>
- [27] NEC-Dokument, *Uncooled IR 320 DETECTOR UNIT HX0830*, BGE010-2006-03-AF (2nd Ed.), 2006
- [28] A. R. Jha, *Infrared Technology*, Wiley & Son, 2000
- [29] T. Mikaelian, *Microbolometer Project*, York University & Spectral Applied Research Inc, 2002
- [30] W. Demtröder, *Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme*, Springer, 2005
- [31] A. Tahar und J. Stollenwerk, *Einführung in die Fehlerrechnung*, FH Köln, 2005
- [32] FLUKE Internetpräsenz, *Ti20*
URL: http://www.fluke.de/comx/show_product.aspx?locale=dede&pid=35578

- [33] NEC San-ei,
 URL: http://www.necsan-ei.co.jp/osd/thermography/catalog/TH9100Pro_E.pdf
 URL: <http://www.nec.co.jp/geo/en/products/hx0830m1.html>
- [34] Wikipedia, die freie Enzyklopädie, *Wikipedia*
 URL: <http://de.wikipedia.org/>
- [35] B. Appel, FLUKE, *private Mitteilung*, 2007
- [36] S. Hinterseer und R. Geipert, FLIR, *private Mitteilung*, 2007
- [37] J. Bruhns, NEC San-ei, *private Mitteilung*, 2007
- [38] Dr. Wode, CEDIP, *private Mitteilung*, 2007
- [39] Hr. Siska, TROTEC, *private Mitteilung*, 2007
- [40] J. W. Eaton et al., *Octave 3.0*, 2007
 URL: <http://www.gnu.org/software/octave/>
- [41] L. Bergmann und C. Schaefer, OPTIK, Band 3, 9. Auflage, de Gruyter, 2004
- [42] A. Godeke und J. Lahnemann, *Auger- und Elektronenverlustspektroskopie*, FU Berlin, 2006
 URL: <http://www.physik.fu-berlin.de/simlaehne/jonas/wissen/f-praktikum/FP-B09-Auger.pdf>
- [43] Dr. A. Ulrich, TU-München, *private Mitteilung*, 2008
- [44] Grundpraktikum Uni-Bremen,
 URL: http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/scripts/Fehlerrechnung_Uni-Bremen.pdf, Uni Bremen, 2001/2002
- [45] H. Kaplan, *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*, SPIE Optical Engineering, 1999

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Martina Reithmeier

München, den 31. März 2008

