

# 1 Zielsetzung

In folgender Aufgabe ist es unser Ziel mit Hilfe von Wärmebildaufnahmen der “Seek Thermal” Anwendung den Emissionsgrad einer Fläche des “Leslie” Würfels zu bestimmen. Hierzu werden zwei verschiedene Datenquellen herangezogen: einerseits das Wärmebild im JPEG Format, andererseits die unveränderten Temperaturwerte aus einer TIFF Datei. Beide Quellen repräsentieren jeweils dieselbe Aufnahme, wodurch ein direkter Vergleich möglich ist. In unserer Vorgehensweise zur Auswertung legen wir besonderen Wert auf die Quantifizierung der Messunsicherheit diverser Quellen. Neben dem Einsatz statistischer Analysewerkzeuge lässt sich so besser Abschätzen, ob zusätzliche Fehlerfaktoren unzureichend berücksichtigt wurden.

## 2 Auswertungsmethodik

### 2.1 JPEG Verarbeitung

Die Aufnahmen der Kamera werden von der Software standardmäßig als JPEG Dateien abgespeichert. Dies ist für eine weitere quantitative Auswertung problematisch, da die gemessenen Temperaturen in RGB-Werte umgewandelt werden. Zusätzlich ist die Erstellung von JPEG Dateien mit dem Verlust von Bildinformation gekoppelt. Dementsprechend ist es für eine quantitative Auswertung notwendig die ursprünglichen Temperaturinformationen für jeden Pixel möglichst genau wiederherzustellen. Dies wird in zwei Schritten bewerkstelligt: Einerseits der Zuordnung von Farb- und Temperaturwerten mittels des im Bild inkludierten Farbskala, andererseits der Umwandlung aller Pixel in Temperaturen.

#### 2.1.1 Farb-Temperatur Zuordnung

Jedes Bild verfügt über eine Farbskala, welche zum visuellen Abschätzen der Temperaturen innerhalb des Bildes dient. Bei der Wahl des Aufnahmemodus ist es wichtig eine lineare Farbskala zu verwenden, da es andernfalls nicht möglich ist eine genaue Temperaturzuordnung zu finden. Der Maximal- und Minimalwert der Skala ist in der App jeweils mit der entsprechenden Temperatur gekennzeichnet. Mit Hilfe dieser Informationen lässt sich eine Zuordnung von Farbwert und Temperatur erzeugen. Für den  $k$ -ten Pixel der Farbskala kann die korrespondierende Temperatur  $T_k$  mittels folgender Formel berechnet werden:

$$T_k = \frac{k}{n} (T_{max} - T_{min}) + T_{min} \quad (1)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Pixel der Farbskala repräsentiert. Die beiden angegebenen Randtemperaturen  $T_{min}$  und  $T_{max}$  werden jeweils ganzzahlig angezeigt. Dies lässt die Frage offen, ob diese zur Präsentation auf- oder abgerundet wurden. Die Standardunsicherheit der Randtemperaturen  $u_{round}$  kann quantifiziert werden durch:

$$u_{round} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Folglich ergibt sich ein möglicher Temperaturfehler für jeden Farbwert der Skala, welcher sich über die Fehlerfortpflanzung berechnen lässt:

$$u_k = \sqrt{\left(\frac{k}{n} u_{round}\right)^2 + \left(\left(1 - \frac{k}{n}\right) u_{round}\right)^2} \quad (3)$$

Hier beschreibt  $u_k$  die Standardunsicherheit des berechneten Temperaturwerts der  $k$ -ten Skalenfarbe.

#### 2.1.2 Farbinterpolation

Nun sind zwar die Temperaturen für alle Farben der Farbskala bekannt, jedoch können die Pixel des eigentlichen Bildes Farbwerte besitzen, die zwischen jenen der Skala liegen. Mit Hilfe von Interpolation lassen sich auch diesen Farben Temperaturen zuordnen. Im Allgemeinen ist die Interpolation von RGB Werten jedoch keine einfache Aufgabe. Der Farbverlauf der Skala stellt eine dreidimensionale Kurve im RGB-Raum dar, welche auf Grund des JPEG Formats über ungenaue Farbwerte verfügt. Dies schließt die Anwendung vieler üblicher Interpolationsmethoden aus. Eine mögliche Variante ist der Einsatz von

Nearest-Neighbor Interpolation, welche allerdings zu einem zusätzlichen Interpolationsfehler führt.

Alternativ kann durch die Verwendung einer Skala in Graustufen das Problem der Farbinterpolation im Gesamten umgangen werden. In diesem Fall liegen alle Farbwerte auf einer eindeutig definierten Linie, wodurch lineare Interpolation ein präzises Ergebnis liefert.

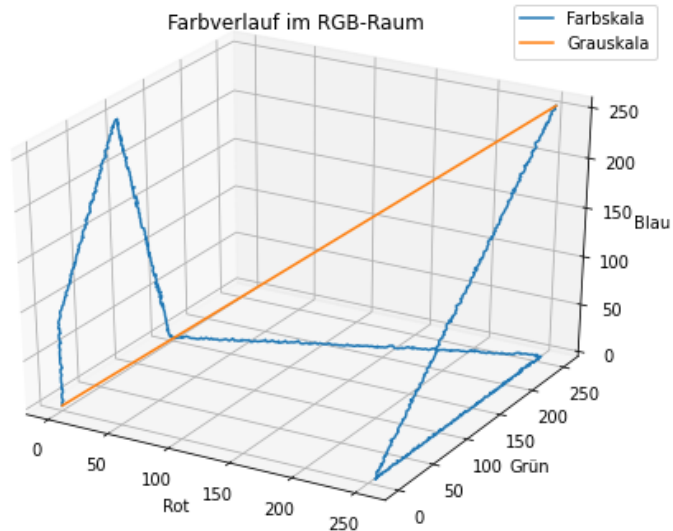


Abbildung 1: Vergleich der Kurve einer Farbskala und einer Grauskala im RGB-Raum.

Die zugehörigen Unsicherheitswerte der Temperatur für jeden Pixel im Bildes  $u_i$  können ebenso interpoliert werden. Sie kombinieren sich mit der thermischen Messungenauigkeit der Kamera. Eine Internetrecherche hat für das Modell "Seek Compact XR" eine Temperaturtoleranz von  $tol_{th} = 0.07^\circ C$  ergeben. Weitere Informationen konnten nicht aufgefunden werden.

$$u_{th} = \frac{tol_{th}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$u_i = \sqrt{u_{th}^2 + u_{k,interp}^2} \quad (5)$$

## 2.2 TIFF Verarbeitung

Die Wahl der entsprechenden Einstellung in der Seek Thermal App ermöglicht es aufgenommene Bilder im TIFF Format abzuspeichern. Dieses Bildformat ist in der Lage mehrere Bilder in eine Datei zusammenzufassen. Im Falle der Seek App befinden sich darunter auch die gemessenen unveränderten Temperaturwerte. Dementsprechend entfällt die Notwendigkeit die Temperaturen von den Farbwerten der Pixel abzuleiten. Der relative Fehler jedes Temperaturwertes ist in diesem Fall rein von der thermischen Messgenauigkeit der Kamera bestimmt.

## 2.3 Emissionsgradbestimmung

Im Falle eines schwarzen Körpers ist die von der Kamera erfasste Strahlungsleistung definiert durch:

$$P(T) = \sigma f T^4 \quad (6)$$

Die reale erfasste Strahlungsleistung kann vereinfacht mittels des Emissionsgrades ausgedrückt werden. Der Anteil der reflektierten Strahlung wird während der Versuche als konstant angenommen. Dementsprechend kann aus der Differenz zwischen der gemessenen Temperatur  $T_m$  und tatsächlichen Temperatur  $T_w$  aus zwei Versuchen der Emissionsgrad  $\epsilon$  berechnet werden.

$$P(T_m) = \epsilon \cdot P(T_w) + (1 - \epsilon) \cdot P(T_u) \quad (7)$$

$$T_m^4 = \epsilon \cdot T_w^4 + (1 - \epsilon) \cdot T_u^4 \quad (8)$$

$$T_m^4 - \epsilon \cdot T_w^4 = (1 - \epsilon) \cdot T_u^4 = C = \text{const.} \quad (9)$$

$$T_{m,1}^4 - \epsilon \cdot T_{w,1}^4 = T_{m,2}^4 - \epsilon \cdot T_{w,2}^4 \quad (10)$$

$$\epsilon = \frac{T_{m,1}^4 - T_{m,2}^4}{T_{w,1}^4 - T_{w,2}^4} \quad (11)$$

Um die Genauigkeit des auf diese Weise bestimmten Emissionsgrades zu erhöhen, werden an Stelle eines einzelnen gemessenen Temperaturwertes  $T_m$  die gemittelten Temperaturen  $\bar{T}_m$  innerhalb eines definierten Referzbereiches verwendet.

$$\bar{T}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (12)$$

Da der Emissionsgrad der Referenzstelle ( $\epsilon_w$ ) bekannt ist, kann der Emissionsgrad der Kamera ( $\epsilon_m$ ) berechnet werden. Weiters kann für das gesamte Bild der Emissionsgrad jedes einzelnen Pixel bestimmt werden. Diese Werte beziehen sich auf die tatsächliche Temperatur des Körpers  $T_w$  und sind nur für diesen gültig.

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon}{\epsilon_w} \quad (13)$$

$$\epsilon_i = \frac{T_i^4 - C}{\epsilon_m \cdot T_w^4} \quad (14)$$

Die entsprechenden Standardunsicherheiten können mit folgenden Formeln berechnet werden:

$$u_{\bar{T}_m} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{T_i^2 + u_i^2}{n} - \bar{T}_i^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial T_{m,1}} = \frac{4T_{m,1}^3}{T_{w,1}^4 - T_{w,2}^4} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial T_{m,2}} = -\frac{4T_{m,2}^3}{T_{w,1}^4 - T_{w,2}^4} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial T_{w,1}} = -\frac{4T_{w,1}^3 (T_{m,1}^4 - T_{m,2}^4)}{(T_{w,1}^4 - T_{w,2}^4)^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial T_{w,2}} = \frac{4T_{w,2}^3 (T_{m,1}^4 - T_{m,2}^4)}{(T_{w,1}^4 - T_{w,2}^4)^2} \quad (19)$$

$$u_\epsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial T_{m,1}}\right)^2 u_{T_{m,1}}^2 + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial T_{m,2}}\right)^2 u_{T_{m,2}}^2 + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial T_{w,1}}\right)^2 u_{T_{w,1}}^2 + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial T_{w,2}}\right)^2 u_{T_{w,2}}^2} \quad (20)$$

$$u_C = \sqrt{(4T_m^3)^2 u_{T_m}^2 + (-4\epsilon T_w^3)^2 u_{T_w}^2 + (-T_w^4)^2 u_\epsilon^2} \quad (21)$$

$$u_{\epsilon_m} = \sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon_w}\right)^2 u_\epsilon^2 + \left(-\frac{\epsilon}{\epsilon_w^2}\right)^2 u_{\epsilon_w}^2} \quad (22)$$

$$u_{\epsilon_i} = \sqrt{\left(\frac{4T_i^3}{\epsilon_m T_w^4}\right)^2 u_{T_i}^2 + \left(-\frac{1}{\epsilon_m T_w^4}\right)^2 u_C^2 + \left(-\frac{T_w^4 (T_i^4 - C)}{(\epsilon_m T_w^4)^2}\right)^2 u_{\epsilon_m}^2 + \left(-\frac{4\epsilon_m T_w^3 (T_i^4 - C)}{(\epsilon_m T_w^4)^2}\right)^2 u_{T_w}^2} \quad (23)$$

## 2.4 Annahmen der Fehlerbereiche

In folgender Tabelle sind unsere Abschätzungen der Toleranzbereiche angeführt:

Name	betreffende Variable(n)	Fehlerbereich	zugehörige Standardunsicherheit
Thermische Auflösung	$T_i$	$\pm 0.07^\circ C$	$u_{th}$
Skalenrundung	$T_{min}, T_{max}$	$\pm 0.5^\circ C$	$u_{round}$
Referenztemperatur	$T_{w,1}, T_{w,2}$	$\pm 0.5^\circ C$	$u_{T_w}$
Referenzemissionsgrad	$\epsilon_w$	$\pm 0.05$	$u_{\epsilon_w}$

## 3 Ergebnisauswertung

Die zuvor beschriebenen Auswertungsschritte werden nun verwendet, um den Emissionsgrad einer Fläche des Leslie Würfels abzuschätzen. Im ersten Schritt werden möglichst homogene Bereiche des Klebebandes mit bekannten Emissionsgrad ausgewählt.

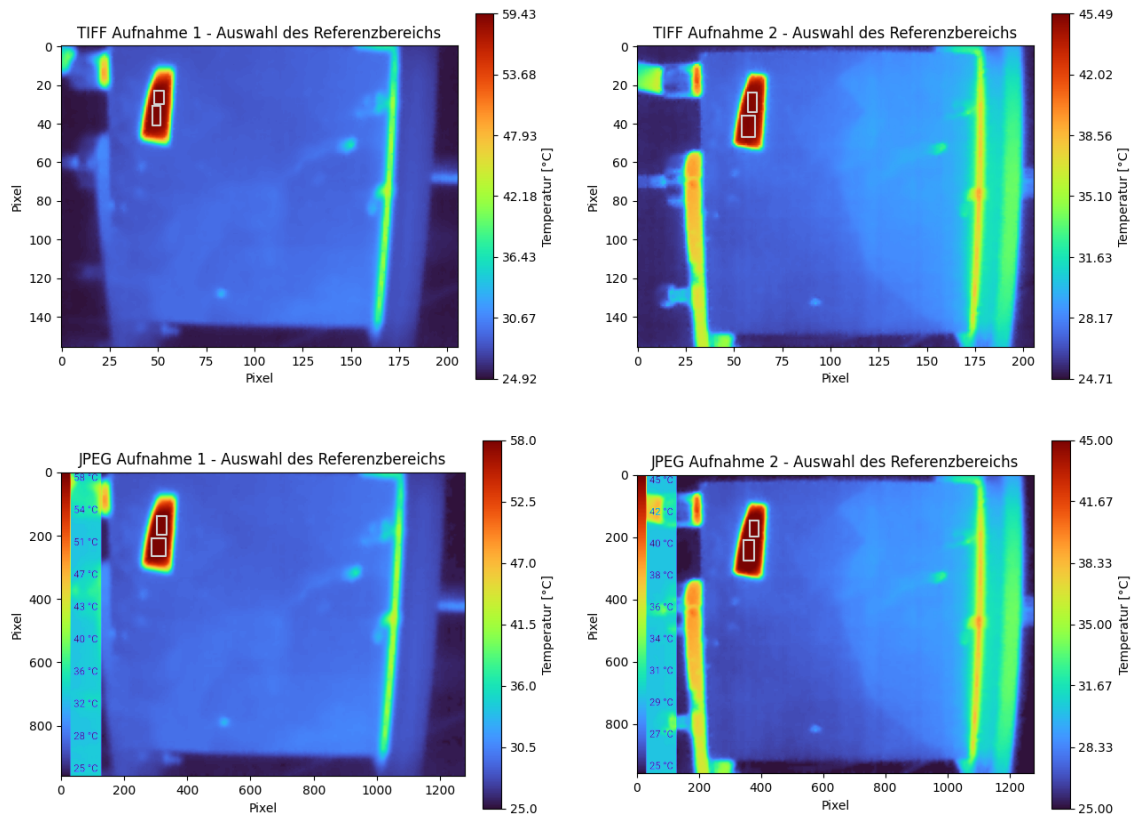


Abbildung 2: Die Auswahl eines Referenzbereiches (graue Rechtecke) mit bekanntem Emissionsgrad. Aus diesem Bereich werden alle Temperaturwerte zur Berechnung des tatsächlichen Emissionsgrades gemittelt.

Die Temperaturen in diesem Bereich werden gemittelt und dienen als Messwerte ( $\bar{T}_{m,1}, \bar{T}_{m,2}$ ). Sie werden verwendet um den kombinierten Emissionsgrad  $\epsilon$  und in weiterer Folge den Emissionsgrad der Kamera  $\epsilon_m$  zu bestimmen. Unter der Annahme, dass  $\epsilon_m$  für das gesamte Bild gleich ist, kann der Emissionsgrad für jeden Pixel  $\epsilon_i$  berechnet werden. Schlussendlich wird ein Bereich der zu messenden Flächen ausgewählt und die gemittelten Emissionsgrade verglichen.

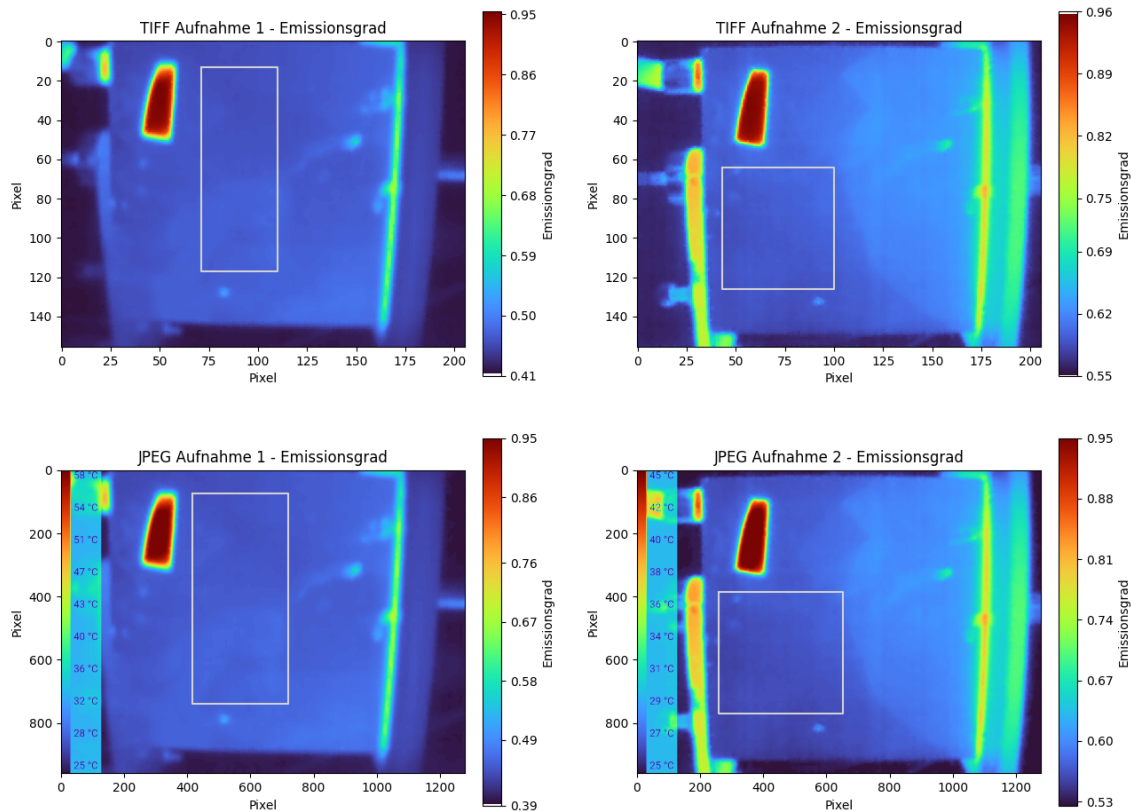


Abbildung 3: Der berechnete Emissionsgrad für jeden Pixel der Bilder. Da die Temperatur des Würfels als Referenz herangezogen wurde, ist das Resultat nur für diesen gültig. Für eine Punktabschätzung des Emissionsgrades werden alle Werte im ausgewählten Bereich nochmals gemittelt.

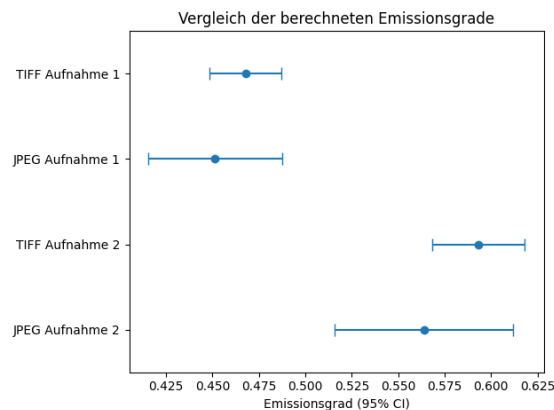


Abbildung 4: Direkter Vergleich des gemittelten Emissionsgrad innerhalb der Auswahlbereiche.

## 4 Schlussfolgerung

Das angewandte Verfahren versucht aus Datenquellen mit fraglicher Genauigkeit brauchbare Emissionswerte zu generieren. Die Resultate zeigen jedoch eine enorme Abweichung zwischen realen und gemessenen Werten. Da es sich bei der zu bestimmenden Fläche um mattes Aluminium handelt, ist von einem wahren Emissionsgrad zwischen 0.1 und 0.2 auszugehen. Dies ist weit entfernt von dem ermittelten Wertebereich von 0.4 bis 0.62. Auch die berechneten Unsicherheiten können diese Diskrepanz nicht erklären.

Mögliche Gründe hierfür sind vielseitig:

Einerseits wurden etliche Annahmen getroffen, sowohl Explizite bei der Definition von Fehlerbereichen als auch Implizite anhand der gewählten Berechnungen. So ist zum Beispiel die Annahme, dass die Menge der reflektierten Strahlung für beide Aufnahmen gleich ist in der Praxis sehr unwahrscheinlich. Dies könnte zu einem größeren Fehler führen als unsererseits erwartet.

Andererseits könnte die kamerainternen Bildverarbeitung nicht unseren Erwartungen entsprechen, wodurch sich ein systematischer Fehler in unserem Auswerteverfahren ergibt.

Zumindest der direkte Vergleich von TIFF und JPEG zeigt ein erwartetes Resultat: Die Verwendung von JPEG als Datenquelle führt zu mehr Unsicherheit bei dem bestimmten Emissionsgrad.