



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.

ZfP-Sonderpreis der DGZfP beim Landeswettbewerb Jugend forscht

## NORDRHEIN-WESTFALEN



### **Wärmemessung an Oberflächen**

Christopher Durand

Timo Hoffmans

Jassine Amraue

#### **Schule:**

Math. Nat. Gymnasium Mönchengladbach  
Rheydter Straße 65  
41065 Mönchengladbach

# **Wärmemessung an Oberflächen**

Christopher Durand, Timo Hoffmans, Jassine Amraue

## **Inhaltsangabe**

### **1. Die Idee**

### **2. Aufbau**

#### 2.1 Hardware

##### 2.1.1 Mechanischer Aufbau

##### 2.1.2 Elektronik

#### 2.2 Software

##### 2.2.1 Konzept

##### 2.2.2 Aufbau der Hardwareansteuerung

##### 2.2.3 Ansteuerung unserer Hardware

###### 2.2.3.1 Thermometer

###### 2.2.3.2 Schrittmotoren

##### 2.2.4 Grafische Darstellung

##### 2.2.5 Benutzeroberfläche

### **3. Bedienung der Programmoberfläche und Ablauf der Messung**

#### 3.1 Größe des Oberflächenscans bestimmen

#### 3.2 Die Messung

#### 3.3 Optimierung der Darstellung des Wärmebildes

### **4. Einsatzmöglichkeiten unserer Konstruktion**

### **5. Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlichen Wärmebildkameras**

### **6. Fazit**

# 1. Die Idee

Wir haben uns gefragt, ob es möglich ist, mit Hilfe eines handelsüblichen Infrarotthermometers die Temperatur einer Oberfläche in vielen Messpunkten abzuscannen und wie bei einer Wärmebildkamera grafisch darzustellen.

Eine Wärmebildkamera (auch Thermographie-Kamera oder Infrarotkamera genannt) ist ein Gerät ähnlich einer Videokamera, das aber nicht das sichtbare Licht, sondern die Infrarotstrahlung im Spektralbereich von 3,5 - 14  $\mu\text{m}$  (mittleres Infrarot, kurz MIR), die jeder Gegenstand mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts emittiert, aufnimmt.

Da die Herstellung der dafür benötigten Infrarotdetektoren sehr teuer ist, sind Wärmebildkameras erst ab ca. 4000 Euro erhältlich und haben in dieser Preislage nur eine sehr kleine Auflösung von 16 x 16 Pixel.

Unser Ziel war es, eine vergleichbare Apparatur zu entwickeln, die nur einen Bruchteil kostet. Wir haben uns überlegt, dass es möglich sein muss, ähnliche Funktionen mit einem Infrarotthermometer, das nur die Temperatur eines einzelnen Punktes messen kann, nachzubilden, indem man es mit einer mechanischen Konstruktion bewegt und die Werte mit dem Computer verarbeitet und darstellt.

Ein Infrarotthermometer führt eine Messung in einer Zeit von unter einer Sekunde durch. Man kann bei einer gesamten Messdauer im Bereich von etwa zwei bis vier Minuten zumindest bei unbeweglichen Messobjekten die selbe Auflösung wie eine Wärmebildkamera im unteren Preissegment erreichen, wobei ein Computer mit seiner im Vergleich zu der Elektronik einer Wärmebildkamera gigantischen Rechenleistung noch genügend Möglichkeiten zur Bildoptimierung bietet.

## 2. Aufbau

### 2.1 Hardware

#### 2.1.1 Mechanischer Aufbau

##### **Prototyp (Konstruktion beim Regionalwettbewerb Jugend forscht):**

Zuerst entwickelten wir einen Prototypen. Als Basis für unsere Konstruktion nutzten wir das Gehäuse eines alten HP Deskjet 510-Druckers, da es ideale Befestigungsmöglichkeiten für Elektronik und Halterung bot. Außerdem war ein Anschluss für den Parallelport bereits vorgesehen.

Um das Thermometer horizontal zu bewegen, war es drehbar gelagert und wurde über einen Seilzug von einem Schrittmotor angetrieben.

Es war ebenfalls an einer vertikal drehbaren Achse befestigt. Ein kurz übersetztes Getriebe erhöhte die Kraft des Motors und sollte dafür sorgen, dass das Thermometer nicht kippt, wenn der Motor ausgeschaltet ist. Dies funktionierte leider nicht, da sich der Schwerpunkt des Thermometers bei unserem Prototyp zu weit von der Drehachse entfernt befand.

##### **Neue Konstruktion (Landeswettbewerb Jugend forscht):**

Für den Landeswettbewerb haben wir deshalb eine neue Konstruktion entwickelt, bei der die vertikale Drehachse am Schwerpunkt des Thermometers gelagert ist.

Das Infrarotthermometer ist jetzt an zwei U-förmigen Metallplatten befestigt, mit denen es horizontal und vertikal bewegt werden kann.

Dadurch, dass ein indifferentes Gleichgewicht herrscht, ist die zum Drehen der Achse notwendige Kraft deutlich geringer. Außerdem behält das Thermometer auch seine Position, wenn man die Motorspannung ausschaltet. So können die Motoren auch bei Dauerbetrieb vor Überhitzung geschützt werden.

Die komplette Fertigung aus Metall reduziert ebenfalls die bei Bewegungen entstehenden Vibrationen, die die Messgenauigkeit verringern, auf ein Minimum, sodass sich diese nicht mehr sichtbar auf das Messergebnis auswirken.

## 2.1.2. Elektronik

### **Alte Elektronik (Regional- und Landeswettbewerb Jugend forscht):**

Die erste Elektronik sollte sehr simpel und preiswert aufgebaut werden. Daher verzichteten wir auf komplexe Steuerelektronik und nutzten die 8 Daten-Pins des Parallelports, um die Eingänge der Schrittmotoren anzusteuern.

Wir haben (abgesehen vom Netzteil) nur Widerstände, einen Inverter, 8 Leistungsverstärker vom Typ TDA 2002, eine Diode und LEDs zur Kontrolle verbaut.

Obwohl der TDA 2002 als Audioverstärker konzipiert ist, lässt er sich auch als Leistungsverstärker in Digitalschaltungen einsetzen. Außerdem kann man damit auch auf Grund der integrierten Freilaufdioden induktive Lasten, wie in unserem Fall Schrittmotoren, ohne zusätzliche Beschaltung antreiben.

Die Pins des Parallelports waren direkt über den Inverter und die Leistungsverstärker an den Eingangspins der Schrittmotoren angeschlossen. So war es möglich, die Motoren zu bewegen, indem man die Datenleitungen in einer bestimmten Folge ein- und ausschaltet.

Diese einfache Methode der Ansteuerung ist aber für Schrittmotoren nicht geeignet, da die erreichbare Kraft des Motors gering ist. Wenn der Motor nämlich mit Dauerstrom angesteuert wird, muss man die Betriebsspannung sehr niedrig wählen, um den maximalen Motorstrom nicht zu überschreiten. Eine geringe Betriebsspannung hat allerdings eine geringe Kraft des Motors zur Folge, sodass er manchmal Schritte überspringt.

### **Neue Elektronik (Bundeswettbewerb Jugend forscht):**

Daher haben wir eine neue, effizientere Elektronik entwickelt. Die beiden Motoren werden nun nicht mehr mit Dauerstrom, sondern im sogenannten „Chopper-Betrieb“ angesteuert.

Mit Hilfe dieser Regelung können Schrittmotoren mit geringen Nennspannungen mit weitaus größeren Betriebsspannungen versorgt werden. Dabei werden die Motoren mit Stromimpulsen mit voller Spannung und hoher Frequenz, aber unterschiedlichem Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltzeit, betrieben. So ist man in der Lage, den Motorstrom über die Breite der Impulse bei einer gleichbleibenden Spannung zu regeln.

Auf diese Art und Weise werden die Motoren, ohne Schaden zu nehmen, immer mit der optimalen Spannung versorgt, wodurch sie mehr Kraft entwickeln können.

Der Chopper-Betrieb lässt sich am einfachsten mit den ICs L297 und L298 realisieren, die auch in der Industrie für Schrittmotorsteuerungen Anwendung finden. Diese Schaltung bietet neben der Möglichkeit, den Motorstrom durch einfaches Anlegen einer Analogspannung zu regulieren, auch einen Halbschrittmodus.

Dadurch lässt sich der Motor mit doppelter Genauigkeit bewegen, indem man bei einem Halbschritt je eine Spulenwicklung ausschaltet. Dabei sinkt zwar die maximale Kraft des Motors, die aber immer noch um ein Vielfaches größer ist, als bei der Ansteuerung mit Dauerstrom.

Da neuere Computer und Laptops nicht mehr über einen Parallelport verfügen, wird die neue Elektronik per USB-Schnittstelle mit dem Computer verbunden.

Das USB-Protokoll ist jedoch sehr komplex ist. Deswegen haben wir den USB→UART Chip CP2102 von Silicon Laboratories verwendet. Dieser ermöglicht es, mit dem Computer direkt mit dem Hardware-UART eines Mikrocontrollers, wie über eine RS232-Schnittstelle, zu kommunizieren.

Ein Mikrokontroller vom Typ ATMEGA32 verarbeitet die Daten und steuert die Schrittmotor-ICs an. Genaueres zur Ansteuerung mit dem Computer findet man im Kapitel „Software“.

## 2.2 Software

### 2.2.1 Konzept

Die wichtigsten Designkriterien für unser Programm waren erstens einfache Bedienbarkeit und zweitens Plattformunabhängigkeit. Es sollte auch ohne Fachkenntnis und Lesen einer Anleitung bedienbar sein.

Außerdem sollte man es auf möglichst vielen Betriebssystemen ausführen können. Wir kamen zu dem Ergebnis, dass ausschließlich die direkten Hardwarezugriffe für jedes Betriebssystem neu implementiert werden müssen.

Es bot sich an fast das komplette Programm plattformunabhängig mit Java zu realisieren. Für die Hardware sind dann für jedes System nur ein paar Zeilen C-Code nötig.

### 2.2.2 Aufbau der Hardwareansteuerung

Die Vorteile, die uns Java als objektorientierte Programmiersprache bietet, haben wir genutzt, indem wir das Programm völlig modular aufgebaut haben. So ist die grundlegende Hardwareansteuerung nicht fest im Hauptprogramm enthalten und auf unsere Hardware beschränkt, sondern basiert auf einem Modulsystem. Dadurch ist es leicht möglich, unsere Software um die Unterstützung für weitere Hardware zu erweitern, ohne etwas am Hauptprogramm zu verändern.

Hierbei haben wir auch auf einfache Bedienbarkeit Wert gelegt. Es sollte möglich sein, ein Modul mit eine paar Klicks zu installieren, ohne umständlich Dateien in Programmverzeichnisse kopieren zu müssen. Deswegen gibt es einem Installationsassistenten, der diese Aufgabe für den Benutzer übernimmt.

Alle Hardwaremodule lassen sich dazu über ein verständliches Einstellungsmenü frei konfigurieren.

Im Hauptprogramm ist mit Hilfe von abstrakten Klassen lediglich definiert, welche grundlegenden Eigenschaften und Fähigkeiten ein Thermometer oder eine Motorsteuerung besitzen muss, z.B. eine Temperatur messen oder das Thermometer bewegen. Die eigentlichen Hardwareansteuerung erfolgen mit Hilfe der Modules.

Dies schafft enorme Flexibilität. So lässt sich unsere Software mit jeder Hardware nutzen. Auch denkbar wäre ein Netzwerkmodul, das an andere Rechner angeschlossene Hardware verwendet.

### 2.2.3 Ansteuerung unserer Hardware

#### 2.2.3.1 Das Thermometer

Dem Thermometer liegt ein Funkempfänger bei, der per USB mit dem Computer verbunden wird.

Er enthält ebenfalls den USB→UART Wandler-Chip CP2102 von Silicon Laboratories, den wir auch in unserer neuen Elektronik verbaut haben. Dieser wird nach der Installation des Treibers als virtueller RS232-Port erkannt wird. So lässt sich der Funkempfänger wie ein einfacher COM-Port ansprechen.

Der Empfänger gibt nach jeder erfolgreichen Messung eine Folge von 14 Bytes aus.

Zum Beispiel:

10 21 35 4F 5F 6F 70 80 90 A6 BC C8 D0 EC

Dabei sind die ersten 4 Bit jedes Bytes eine Nummerierung:

10 21 35 4 F ...

Die hinteren 4 Bit sind die eigentlichen Daten. Entfernt man die Nummerierungen und kombiniert die restlichen Datenwerte, ergibt sich eine Folge von 7 Bytes:

01 5F FF 00 06 C8 0C

Das dritte und vierte Byte stellen den Betrag des eigentlichen Temperaturwerts dar:  
 $0x00FF = 255 \rightarrow +/- 25,5^{\circ}C$

Das 1. Bit des 5. Bytes gibt das Vorzeichen der Temperatur an. So ist die Temperatur positiv, wenn das Bit '0' ist und negativ, wenn das Bit '1' ist.

Im vorliegenden Beispiel ist der Wert demnach positiv:

$0x06 = 0b00000110$

Die gemessene Temperatur ist im Beispiel also  $+25,5^{\circ}C$ .

Die übrigen Bytes sind für die Messung nicht relevant.

Wenn das Thermometer z.B. gerade das 3. Byte ausgibt, während eine laufenden Oberflächenmessung einen Messwert anfordert, müsste man einen ganzen Messzyklus des Thermometers abwarten, um einen vollständigen Datensatz von allen nötigen Bytes zu erhalten. Dadurch würde sich die Messzeit wesentlich erhöhen. Um dies zu verhindern, werden während einer Oberflächenmessung die Temperaturwerte in einem Hintergrundthread ständig eingelesen und zwischengespeichert.

So wird die Messgeschwindigkeit des Thermometers optimal ausgenutzt. Die Messdauer verkürzt sich auf diese Weise um bis zu 40%.

Die eingelesenen Daten lassen leicht am Computer mit Hilfe von Bitoperatoren auswerten. Wie der folgende Auszug aus dem Programm zeigt, sind dazu nur wenige Zeilen Code nötig:

```
private static double getTemp(int[] bytes)
{
    int[] values = new int[bytes.length / 2];
    for (int i = 0; i < bytes.length; i += 2)
    {
        // Entfernen der Nummerierungs-Bits
        int val1 = (bytes[i] & 0x0F);
        int val2 = (bytes[i + 1] & 0x0F);
        // Zusammenfügen der Daten zu einem Byte
        values[i / 2] = (val1 << 4) | val2;
    }
    // Zusammenfügen der Datenbytes zu einem Temperaturwert
    double temp = values[2] | (values[3] << 8);
    temp /= 10;
    // Ermitteln des Vorzeichens des Temperaturwerts
    if ((values[4] & 1) == 1)
        temp = -temp;
    return temp;
}
```



### 2.2.3.2 Ansteuerung der Motoren

Die Motoren werden mit der im Kapitel „Hardware“ angesprochenen Elektronik angesteuert. Da auch hier wieder der IC CP2102 zum Einsatz kommt, spricht das Programm die Motorelektronik wie eine RS232-Schnittstelle an. Um die Motoren zu steuern, kann der Computer folgende Kommandos mit der Länge von einem Byte zur Elektronik senden:

Befehl	Bytewerte	ASCII-Werte	Beschreibung
Motorspannung setzen	0x40 - 0x43	@ - C	Bit 1: Motor 1 Bit 2: Motor 2
Motorschritt	0x60 - 0x6F	a - o	Bit 1: Motor 1 bewegen Bit 2: Motor 2 bewegen Bit 3: Motor 1 Richtung Bit 4: Motor 2 Richtung Richtung: 0→links, 1→rechts
Schrittmodus	0x74 - 0x77	t - w	Bit 1: Motor 1 Bit 2: Motor 2 0→Vollschritt, 1→Halbschritt

Auf dem Mikrokontroller in der Motorelektronik läuft ein in C geschriebenes Programm, das diese Befehle auswertet und mit Hilfe Motor ICs die Schrittmotoren bewegt.

### 2.2.4 Grafische Darstellung

Wir haben uns entschieden, zur grafischen Darstellung der Messwerte die Grafikkbibliothek „OpenGL“ zu verwenden.

Ursprünglich wurde OpenGL zur Darstellung von komplexen 3D- Szenen entwickelt, ist aber auf Grund der Hardwarebeschleunigung auch zum schnellen Zeichnen von 2D-Grafiken geeignet. Abgesehen von der hohen Geschwindigkeit ist das Programm extrem leistungsfähig und bietet auch für spätere Erweiterungen ausreichenden Spielraum.

Die einfachste Möglichkeit zur Darstellung ist es, das Bild aus je einem einfarbigen Quadrat pro Messpunkt aufzubauen. OpenGL ermöglicht es jedoch, Eckpunkten eines Rechtecks unterschiedliche Farbwerte zuzuweisen und mittels „Smooth Shading“ die Grafikkarte einen Farbverlauf berechnen zu lassen.

So zeichnet man das Messbild aus Quadraten, deren sich berührende Eckpunkte je einen Messpunkt darstellen. Dadurch ist das Bild nicht grob verpixelt, die Messwerte gehen in gleichmäßigen Verläufen ineinander über.

Die angefertigten Testbilder zeigen, wie gut die Glättung selbst kleinen Messauflösungen.

Die Farbskala, mit der die Messbilder eingefärbt werden, lässt sich nach der Messung auswählen. Man kann auch neue Farbskalen hinzufügen. Diese werden in Form einer XML-Datei in einem Unterordner des Programmverzeichnis abgelegt.

Bisher ist es noch notwendig die XML-Dateien per Hand anzulegen:

Um zum Beispiel eine „Glühfarben-Skala“ zu erstellen, die den Farben von glühenden Metallen nachempfunden und deshalb leicht zu interpretieren ist, muss man die Farbwerte der vier wichtigsten Farbabstufungen Schwarz, Rot, Gelb und Weiß in folgendem Format in eine XML-Datei einzutragen:

```
<colorScale>
<!-- Schwarz -->
<color>
    <red>0</red>
    <green>0</green>
    <blue>0</blue>
</color>
<!-- Rot -->
<color>
    <red>255</red>
    <green>0</green>
    <blue>0</blue>
</color>
<!-- Gelb -->
<color>
    <red>255</red>
    <green>255</green>
    <blue>0</blue>
</color>
<!-- Weiß -->
<color>
    <red>255</red>
    <green>255</green>
    <blue>255</blue>
</color>
</colorScale>
```

Das Programm erzeugt daraus eigenständig eine Farbskala mit allen Farbabstufungen zwischen den aufgeführten Werten.

Später wird es möglich sein, Farbskalen bequem über die grafische Oberfläche zu erstellen.

## 2.2.5 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche haben wir mit dem für nicht-kommerzielle Benutzung frei verfügbaren Toolkit Qt, das seit Version 4 auch offiziell für Java zu Verfügung steht, kon-

zipiert. Es kann einen OpenGL-Kontext erzeugen und ist für alle unterstützten Betriebssysteme verfügbar.

Die Benutzeroberfläche haben wir aus Gründen der Bedienbarkeit auf das Wesentliche reduziert. Das Programmfenster besteht aus drei Spalten.

Links befindet sich das Hauptmenü. Rechts findet man Einstellungen für eine Messung. Der mittlere Bereich besteht aus einem Anzeigefeld für das Messbild und einem Menü zur Einstellung der Farbskalierungen.

## 3. Bedienung der Benutzeroberfläche und Ablauf der Messung

### 3.1 Grösse der Oberflächenmessung bestimmen

Zunächst klickt man im Hauptmenü auf den Button mit der Aufschrift „Neue Messung“, um eine neue Messung zu starten.

Danach kann mit den vier verschiedenen Pfeilbuttons auf der rechten Seite der Benutzeroberfläche der Schrittmotor zur gewünschten Startposition hin ausgerichtet werden. Ist dies geschehen, klickt man auf „Aktuellen Punkt als Startpunkt setzen“. Analog geht man vor, um den Endpunkt zu bestimmen. („Aktuellen Punkt als Endpunkt setzen“).

Der Messbereich ist immer Rechteckig. Start- und Endpunkt sind also zwei Eckpunkte dieses Rechtecks, die sich diagonal gegenüber liegen.

Wenn die Größe des zu messenden Bereichs festgelegt wurde, muss die Auflösung des späteren Wärmebildes festgelegt werden. Dazu gibt man in den Eingabefeldern mit den Bezeichnungen „Messpunkt in x-Richtung:“ und „Messpunkt in y-Richtung:“ an, wie viele Messpunkte das Bild bekommen soll. Wenn zum Beispiel eine Auflösung von 16x16 gewünscht ist, gibt man in die beiden Eingabefelder jeweils „16“ ein.

Ist man mit seinen Einstellungen zufrieden, klickt man den Button mit der Aufschrift „Messung starten“ an.

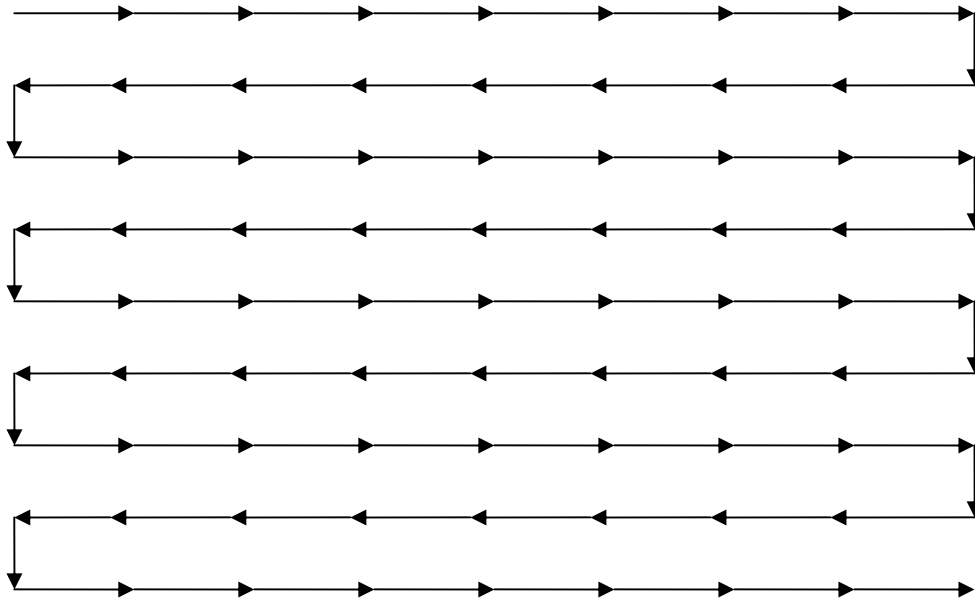
### 3.2 Die Messung

Sind die oben beschriebenen Vorbereitungen abgeschlossen, berechnet der Computer zunächst, um wie viele Schritte das Thermometer pro Messpunkt weiterbewegt werden muss.

Dazu subtrahiert er die x bzw. y-Koordinaten beider festgelegter Punkte voneinander und teilt diesen Wert durch die Anzahl der Messpunkte in x bzw. y-Richtung, die der Benutzer festgelegt hat.

Wenn die gewählte Messpunktanzahl nicht durch die Anzahl der Messpunkte teilbar ist, wird die Größe des Bereichs automatisch angepasst.

Anschließend wird die Messung gestartet. Der Motor scannt die Oberfläche nach folgendem Muster ab:



Jede Pfeilspitze stellt eine Messpunkt dar.

Ist die Messung abgeschlossen, setzt der Computer die gemessenen Temperaturwerte zu einem Wärmebild zusammen. Dazu ermittelt er mit Hilfe der Farbskala aus den Temperaturen Farbwerte und zeichnet daraus das Messbild.

Während der Präsentation beim Landeswettbewerb zeigte es sich, dass bei großen Messobjekten im Randbereich perspektivische Verzerrungen auftreten, die sich auch auf die grafische Darstellung auswirken. Auf Grund dieser Anregung der Jury sind wir zurzeit dabei, dieses Problem zu beheben. Bis zum Bundeswettbewerb werden wir einen entsprechenden Verbesserungsvorschlag ausarbeiten.

### 3.3 Optimierte Darstellung des Wärmebildes

Damit einzelne Details des Wärmebildes besser hervorgehoben werden können, haben wir in unsere Software einige spezielle Funktionen eingebaut. So kann zum Beispiel die Farbskala geändert werden. In einer Auswahlbox kann aus verschiedenen Farbskalen die passende herausgesucht werden.

Außerdem kann man einstellen, welches der tiefste und welches der höchste Temperaturwert sein soll, der angezeigt wird. Dazu gibt man einfach in dem Eingabefeld mit der Bezeichnung „untere Grenze“ den gewünschten Tiefstwert und in dem Eingabefeld mit der Bezeichnung „obere Grenze“ den gewünschten Höchstwert ein.

Temperaturunterschiede können so auf verschiedene Arten je nach gewünschter Kernaussage hervorgehoben werden.

## 4. Einsatzmöglichkeiten unserer Konstruktion

Das von uns entwickelte Gerät kann auf vielfältige Art und Weise zum Einsatz kommen.

In der Schule zum Beispiel könnte es im Chemieunterricht angewendet werden, um die Temperaturentwicklung eines Stoffes während einer Reaktion darzustellen, oder um die Temperatur von Stoffen vor und nach einer Reaktion festzuhalten.

Im Physikunterricht könnte es zur Feststellung von durch Reibung oder elektrisch erzeugter Hitze verwendet werden.

In privaten Haushalten könnte unser Gerät zum Beispiel zur Messung der Temperatur in einem Computer eingesetzt werden um festzustellen, wo es im Computer zu heiß ist und weitere Kühlung angebracht werden muss.

Kabelanbrüche können lokalisiert werden, da das Kabel auf Grund des kleineren Leitungsquerschnitts an der beschädigten Stelle wärmer ist.

Das Gerät kann aber auch dazu eingesetzt werden, kleinere Wärmeisolationen an Gebäuden auf ihre Dichtigkeit hin zu überprüfen. Dies ist mit Sicherheit bei entsprechender Verfeinerung der Apparatur eine kommerziell viel versprechende Einsatzmöglichkeit unseres Gerätes.

## 5. Vor – und Nachteile gegenüber herkömmlichen Wärmebildkameras

### Vorteile:

1. Man kann bei unserer Konstruktion selbst festlegen, wie groß der Bereich sein soll, in dem gemessen wird. Damit können gezielte Messungen in Teilbereichen von größeren Oberflächen durchgeführt werden.
2. Unsere Konstruktion hat verschiedene Farbskalen, mit denen die Wärmebilder unterschiedlich dargestellt werden können. Temperaturunterschiede können so auf verschiedene Arten je nach gewünschter Kernaussage hervorgehoben werden.
3. Der Temperaturmessbereich unserer Konstruktion reicht von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+1000^{\circ}\text{C}$ . Der Messbereich von den meisten Wärmebildkameras reicht nur von ca.  $-20^{\circ}\text{C}$  bis ca.  $+400^{\circ}\text{C}$ .
4. Bei unserer Konstruktion kann die Anzahl der Messpunkte an der Oberfläche selbst bestimmt werden, wozu Wärmebildkameras nicht in der Lage sind. Je mehr Messpunkte gewählt werden, desto länger dauert die Messung, desto schärfer wird aber auch das Bild.
5. Die Konstruktion, die wir entwickelt haben, ist erheblich preisgünstiger als Wärmebildkameras. Die Kosten für unsere Konstruktion betragen ca. 250€ (180€ für das Infrarotthermometer, je 10€ für die 2 Schrittmotoren und ca. 50€ für die Konstruktion und die Elektronik). Die Kosten einer handelsüblichen Wärmebildkamera liegen in etwa bei 4000€. Durch den geringen Preis werden nicht nur Firmen in die Lage versetzt, eine „Wärmebildkamera“ anzuschaffen, sondern auch Schulen und private Haushalte können ohne erhebliche Kosten von Wärmebildern profitieren.

### Nachteile:

1. Die maximale Messentfernung unserer Konstruktion wird durch die Optik des Infrarotthermometers begrenzt. Je weiter man sich vom Messobjekt entfernt, desto größer wird der Messpunkt des Thermometers. Bei unserem Thermometer hat der Messfleck die von einem dreißigstel der Messentfernung.
2. Unsere Konstruktion ist recht groß und muss an einen PC oder an einen Laptop angeschlossen werden. Daher ist sie nicht so mobil wie eine Wärmebildkamera, wobei dies jedoch bei den meisten Einsatzmöglichkeiten unproblematisch ist.
3. Unsere Entwicklung benötigt eine relativ lange Zeit, um die Oberflächen abzuscanen und deren Temperatur zu messen, unser Thermometer benötigt für einen Punkt etwa 0,6 Sekunden. Für ein Wärmebild mit einer Auflösung von  $16 \times 16$  benötigt sie somit 2-3 Minuten. Wärmebildkameras erstellen das Wärmebild sofort. In Anbetracht des günstigen Preises erscheint uns dies jedoch durchaus akzeptabel. Durch Verringerung der Messauflösung kann die Bearbeitungszeit verkürzt werden.
4. Sich bewegende Objekte können nicht gemessen werden.

## 6. Fazit

Das vorliegende Gerät ermöglicht es, Wärmebilder von unbeweglichen Objekten zu erstellen, die in ihrer Qualität an die Bilder einer Wärmebildkamera heranreichen.

Der augenscheinliche Vorteil unserer Konstruktion ist der Preis, der um ein Vielfaches geringer ist als der einer handelsüblichen Wärmebildkamera. Dies lässt die gegenüber herkömmlichen Wärmebildkameras vorhandenen Nachteile wie Größe des Gerätes, Messdauer, begrenzte Entfernung zum Messobjekt und Unmöglichkeit der Messung von sich bewegenden Objekten akzeptabel erscheinen. Die potenziellen Einsatzmöglichkeiten müssen diesen Einschränkungen angepasst werden, wobei immer noch eine Vielzahl von denkbaren Anwendungen übrig bleibt.

Wenn man hochwertigere, aber auch teurere Infrarotthermometer mit einer Ansprechzeit von unter 200ms nutzt, würde unsere Konstruktion durch Verkürzung der Bearbeitungszeit bzw. Verdichtung der Messpunkte qualitativ noch näher an eine Wärmebildkamera heranreichen.

Positiv sind die gegenüber herkömmlichen Wärmebildkameras vorhandenen Möglichkeiten von Voreinstellungen des produzierten Wärmebildes und das Messbild als Grafikdatei abzuspeichern.

Es bestehen aber auch Optionen, die Einsatzmöglichkeiten unseres Gerätes aufgrund der immensen Rechenleistung des integrierten Computers zu erweitern, der bei herkömmlichen Wärmebildkameras ja nicht direkt zur Verfügung steht. So kann z.B. ein Messobjekt für eine längere Zeit dauerhaft abgescannt und die Temperaturentwicklung in einer 3D-Grafik dargestellt werden.