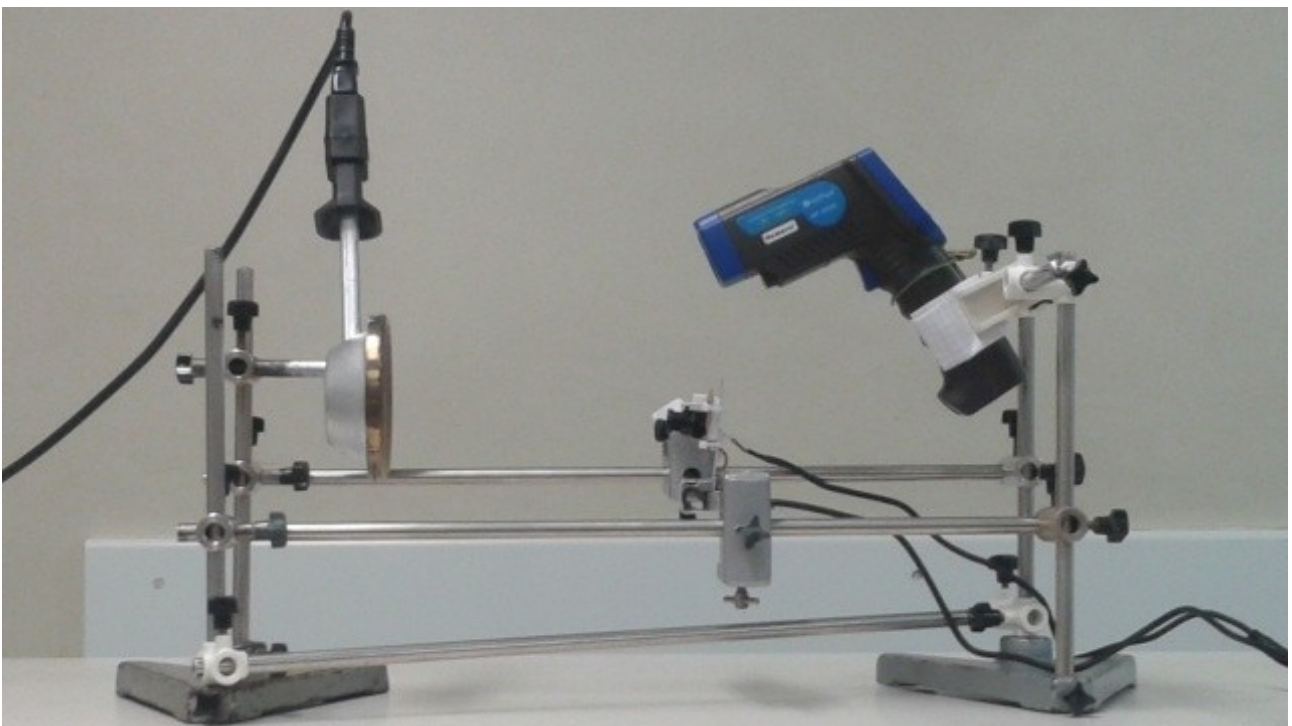


# Untersuchungen zu Möglichkeiten der Thermografie mit Hilfe eines infrarot-sensitiven Bildsensors

Pablo Grimm und Niklas Schmidt

Fachbereich: Physik,  
betreuender Fachlehrer: Herr Bernd Jahn

12. November 2014



# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Theorie.....	4
2.1 Infrarotstrahlung.....	4
2.2 Gesetze zur Wärmestrahlung.....	4
2.2.1 Die Strahlungsintensität.....	4
2.2.2 Absorptionsgrad und Emissionsgrad.....	4
2.2.3 Zum Kirchhoffschen Gesetz.....	5
2.2.4 Das Stefan-Boltzmann-Gesetz.....	5
2.2.5 Zum Wienschen Verschiebungsgesetz.....	5
2.3 Kameras.....	6
2.3.1 Typische Wärmebildkameras.....	6
2.3.2 CCD- und CMOS-Kameras.....	6
3. Praxis.....	8
3.1 Messreihen mit Kameras.....	8
3.1.1 Vorbereitungen.....	8
3.1.2 Auswertung.....	9
3.2 Messreihen mit Spektrometer.....	11
3.3 Berechnungen.....	12
4. Anwendungsbereiche.....	13
4.1 Nachtsichtgerät Eigenbau.....	14
4.1.1 Vergleich mit einer Bildverstärker-Röhre.....	15
4.1.2 Vergleich mit einer Wärmebildkamera.....	16
5. Eigenständigkeitserklärung.....	17
6. Abbildungs- und Literaturverzeichnis.....	17
7. Anhänge.....	19

Die Abschnitte 1, 2.3 und 3 wurden von Niklas Schmidt bearbeitet.

Die Abschnitte 2.1, 2.2 und 4 wurden von Pablo Grimm bearbeitet.

# 1 Einleitung

Das menschliche Auge kann elektromagnetische Strahlung in einem Bereich von 380 nm bis 780 nm wahrnehmen. Doch was liegt jenseits der Grenzen unserer Wahrnehmung? In unserer Facharbeit haben wir uns mit der Infrarotstrahlung, oft auch Wärmestrahlung genannt, und damit zusammenhängenden bildgebenden Verfahren beschäftigt und auseinander gesetzt. Wir modifizierten eine Kamera und konnten so Wärmebilder aufnehmen. Mit Hilfe von Grundkenntnissen der Thermografie haben wir unsere Messmethoden weiter verbessert. Die gewonnenen Erkenntnisse haben wir zum Bau eines einfachen Nachtsichtgeräts verwendet.

Digitale Kameras sind grundsätzlich für Infrarotstrahlung sensitiv. Da dies jedoch zu einer Farbverfälschung des Kamerabildes führen würde und auch die automatische Belichtungseinstellung sonst keine sauberen Ergebnisse liefern würde, wird ein Infrarotsperrfilter eingebaut. Dieser Filter befindet sich oft im Objektiv oder direkt auf den Bildsensor. Mit etwas Geschick ließen sich die Infrarotsperrfilter entfernen, was die von uns verwendeten Kameras wieder für Infrarotstrahlung sensitiv machte.

## 2 Theorie

### 2.1 Infrarotstrahlung

Infrarotstrahlung ist Licht, sie liegt außerhalb des für Menschen sichtbaren Bereichs. Mit einer Wellenlänge von 780 nm bis 1 mm ist Infrarotstrahlung langwelliger als sichtbares Licht (VIS, engl. visible light).

Wir unterteilen Infrarotstrahlung (IR) in nahes (NIR), mittleres (MIR) und fernes Infrarot (FIR). Als nahes Infrarot bezeichnen wir Licht, das etwas langwelliger als rotes Licht ist. Fernes Infrarot ist weiter vom Spektrum des sichtbaren Lichts „entfernt“. Es ist langwelliger.

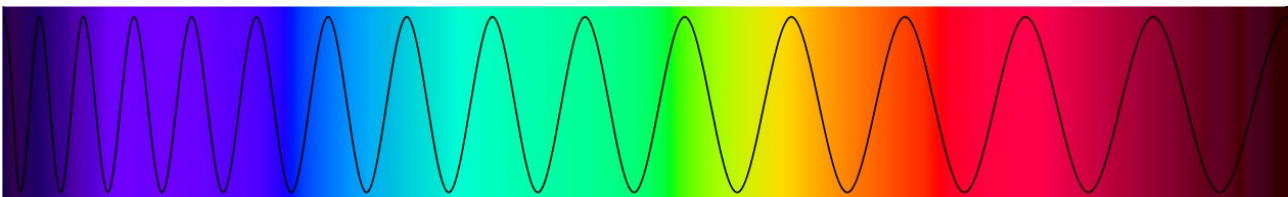


Abbildung 1: Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Wellenlänge und Lichtfarbe

Mit Hilfe eines Infrarotdetektors, wie er beispielsweise in Infrarotthermometern verbaut ist, lässt sich die Wärmestrahlung eines Körpers wahrnehmen. Hierzu wird die absorbierte Strahlungsleistung einer Temperatur zugewiesen. (Vgl. [1], [4])

### 2.2 Gesetze zur Wärmestrahlung

In unseren Versuchen wird Wärmeenergie ohne direkten Kontakt zwischen zwei Körpern übertragen. Je höher die Temperatur eines Körpers ist, desto intensiver ist die von ihm abgegebene Strahlung. (Vgl. [2]; gilt für den gesamten Abschnitt 2.2)

#### 2.2.1 Die Strahlungsintensität

Die Strahlungsintensität  $I$  kann wie folgt definiert werden:

$$I = \frac{\text{transportierte Energie}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}} \quad I := \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$$

#### 2.2.2 Absorptionsgrad und Emissionsgrad

Der Absorptionsgrad  $\alpha$  gibt an, wie stark ein Körper Strahlungsenergie aufnehmen kann.  $\alpha$  ist von der Oberflächenbeschaffenheit und Farbe eines Körpers abhängig. Der Absorptionsgrad eines idealen, schwarzen Körpers ist 1, der eines idealen Spiegels 0. Für  $\alpha$  gilt:

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Intensität}}{\text{auftreffende Intensität}}$$

Der Emissionsgrad  $\epsilon$  gibt an, wie stark ein Körper Strahlungsenergie abgeben kann. Absorptionsgrad und Emissionsgrad stehen in direktem Zusammenhang. Solange keine Transmission stattfindet, also keine Strahlung den Körper durchdringt, gilt für  $\epsilon$ :

$$\epsilon + \alpha = 1 \quad \text{mit } \tau = 0$$

### 2.2.3 Zum Kirchhoffschen Gesetz

Die Strahlungsintensität  $I$  eines Körpers ist proportional zum Absorptionsvermögen  $\alpha$  und zur Strahlungsintensität  $I_s$  des schwarzen Körpers:  $I = \alpha \cdot I_s$ .

Wenn zwei Körper mit unterschiedlichen Temperaturen ihre Temperaturdifferenz durch

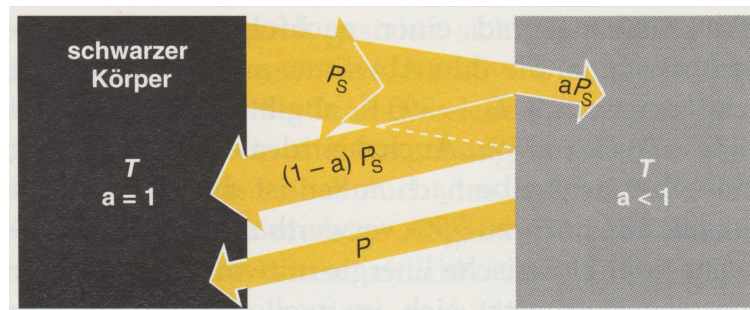


Abbildung 2: Schema zur Verdeutlichung des Kirchhoffschen Gesetzes

Strahlungsenergie ausgleichen, haben sie nach einer gewissen Zeit die gleiche Temperatur. Dies lässt sich an folgendem Beispiel verdeutlichen: Ein schwarzer Körper mit  $\alpha=1$  und ein hellerer Körper mit  $\alpha < 1$  strahlen Strahlungsleistung ab. Dabei haben beide Körper die gleiche Temperatur  $T$ . Der schwarze Körper strahlt eine Leistung  $P_s$  an den helleren Körper ab. Dieser reflektiert eine Leistung von  $(1-\alpha) \cdot P_s$  zurück zum schwarzen Körper, wobei  $\alpha$  der Absorptionsgrad des helleren Körpers ist. Der schwarze Körper absorbiert diese Leistung vollständig, da sein Absorptionsgrad 1 ist. Also nimmt der hellere Körper  $\alpha \cdot P_s$  auf. Diese Leistung strahlt er an den schwarzen Körper ab, da beide Körper das Bestreben haben, ihre Temperaturen einander anzugleichen.

Insgesamt betrachtet gibt der schwarze Körper  $P_s$  ab, der hellere  $(1-\alpha) \cdot P_s + \alpha \cdot P_s = P_s$ . Es besteht zwischen beiden Körpern ein thermisches Gleichgewicht; die Temperaturen beider Körper bleiben gleich.

### 2.2.4 Das Stefan-Boltzmann-Gesetz

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt an, welche Strahlungsleistung  $P$  ein schwarzer Körper mit der Fläche  $A$  bei einer bestimmten Temperatur  $T$  emittiert:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T$$

Dabei gilt für die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma \approx 5,6703 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ .

Da Strahlungsenergie Strahlungsleistung pro Zeit ist, ist auch folgende Definition möglich: Die Strahlungsintensität des schwarzen Körpers wächst mit der 4. Potenz der Temperatur:

$$I = \sigma \cdot T^4$$

### 2.2.5 Zum Wienschen Verschiebungsgesetz

Je mehr thermische Energie ein Körper besitzt, umso kurzwelliger ist die von ihm abgegebene Infrarotstrahlung. Beginnt zum Beispiel Eisen sich zu verflüssigen, so verschiebt sich die Wellenlänge der abgegebenen Strahlung weiter in Richtung des für uns sichtbaren Lichts. Dies ist

als Glühen sichtbar.

Das Wiensche Verschiebungsgesetz gibt an, bei welcher Wellenlänge  $\lambda_{max}$  oder Frequenz  $\nu_{max}$  ein strahlender schwarzer Körper je nach seiner Temperatur die größte Strahlungsleistung abgibt.

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{T}$$

## 2.3 Kameras

### 2.3.1 Typische Wärmebildkameras

Der Sensor einer typischen Wärmebildkamera liefert ein monochromes Bild, welches nur aus Helligkeitsinformationen besteht. Als Sensoren für die einzelnen Pixel einer Wärmebildkamera werden oft Bolometer verwendet. Bolometer ermitteln die auftreffende Strahlungsintensität, indem Strahlungsenergie über einen Absorber bestimmter Fläche aufgenommen und zum Teil an ein thermisches Gegengewicht abgegeben wird. Die Strahlungsintensität ergibt sich aus der Temperatur

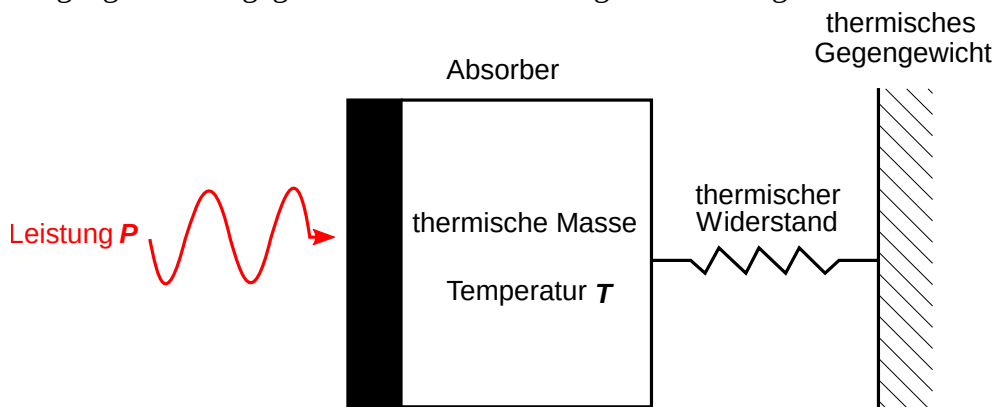


Abbildung 3: Funktionsweise eines Bolometers

der thermischen Masse des Bolometers und der Temperatur des thermischen Gegengewichts. Daher muss die Temperatur des Gegengewichts konstant gehalten werden. Mit Hilfe von Thermoelementen wird der Temperaturunterschied in eine Spannung umgewandelt. Weit verbreitet ist es, diese Helligkeitsinformationen als Falschfarbbild wiederzugeben. Es werden den unterschiedlichen Helligkeitsstufen Farben zugewiesen, die der Mensch mit Wärme oder Kälte assoziiert. Siehe hierzu Abb. 18 im Abschnitt 4.1.2 auf Seite 16. (Vgl. [3], [4], [7])

### 2.3.2 CCD- und CMOS-Kameras

CCD- und CMOS-Sensoren, wie sie heute in elektronischen Kameras üblich sind, verwenden Fotodioden als Lichtsensoren. Bei CCD-Sensoren werden die Fotodioden matrixartig abgefragt, bei CMOS-Sensoren ist pro Fotodiode eine Verstärkerschaltung vorhanden.

Bei Farbsensoren findet sich eine Bayer-Maske vor den ursprünglichen Pixeln, welche nun in drei Subpixel in den Farben Rot, Grün und Blau unterteilt sind, aus denen sich je ein Pixel zusammensetzt. Somit kann aus den einzelnen Farbanteilen ein Farbbild errechnet werden.

Mit Hilfe einer Fotodiode kann die Strahlungsintensität in einen entsprechenden Strom umgewandelt werden. Dies wird durch den fotoelektrischen Effekt hervorgerufen. Fotodioden bestehen aus Silizium, Germanium oder anderen Halbleitern.

Die Kathode besteht aus einem n-dotiertem Halbleiter, die Anode aus einem p-dotierten. Bei der n-Dotierung wird zum Beispiel ein 4-wertiger Halbleiter (z.B. Silizium) mit einem 5-wertigen Atom (z.B. Phosphor) dotiert. Es wird das 5. Elektron des Phosphor-Atoms frei. Es wird zu einem Leitungselektron, welches eine einfach-negative Ladung darstellt.

Wird ein 4-wertiger Halbleiter (z.B. Silizium) mit einem 3-wertigen Atom (z.B. Aluminium) dotiert, so heißt dies p-Dotierung. Das Aluminium-Atom „entrißt“ einem Silizium-Atom ein Elektron, es kommt zur Paarbildung.

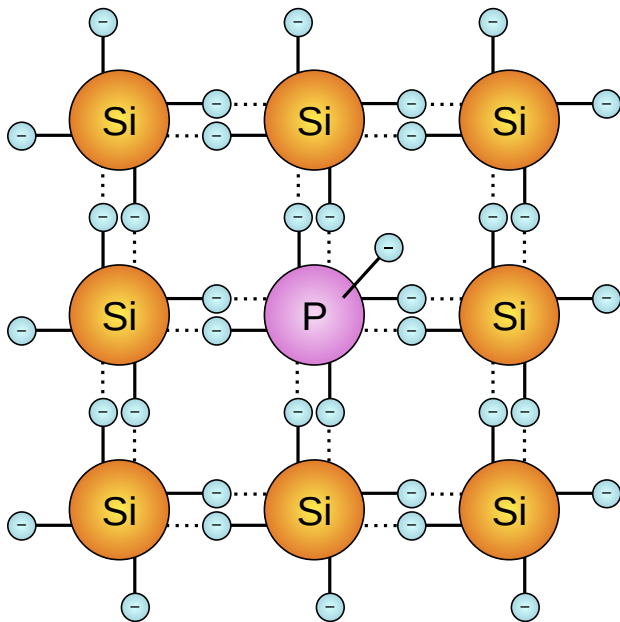


Abbildung 4: n-dotiertes Silizium

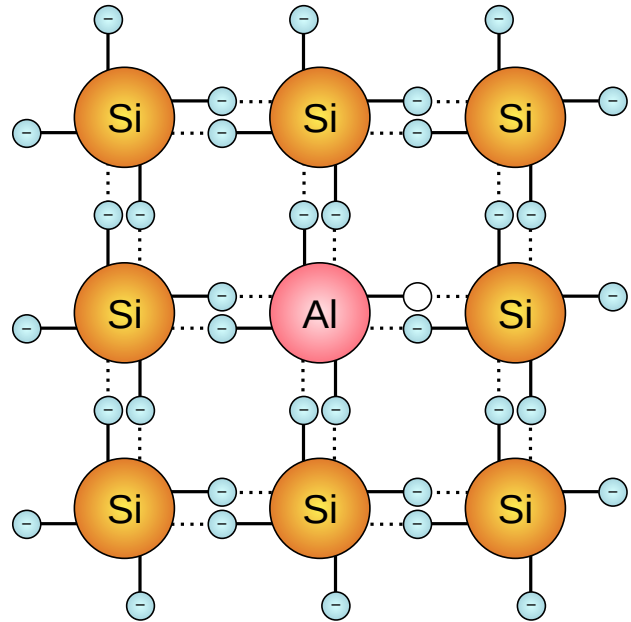


Abbildung 5: p-dotiertes Silizium

Die Berührungsstelle von p-dotiertem und n-dotiertem Material heißt p-n-Übergang.

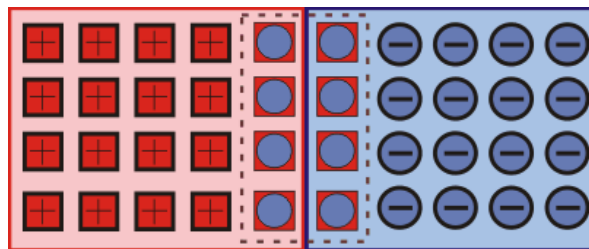


Abbildung 6: p-n-Übergang einer Fotodiode,  
links: p-dotiert, mittig: Sperrschicht, rechts: n-dotiert

Wenn Photonen mit genug Energie auf den p-n-Übergang auftreffen, entstehen Elektron-Loch-Paare, die so genannten Ladungsträger. Am p-n-Übergang driften die Elektron-Loch-Paare in das gleich dotierte Material. Somit setzt ein Stromfluss ein; der Widerstand der Fotodiode nimmt ab.

## 3 Praxis

### 3.1 Messreihen mit Kameras

Bisher haben wir experimentell nachgewiesen, dass es möglich ist, mit einer modifizierten USB-Kamera, deren Infrarot-Sperrfilter entfernt wurde, Infrarotstrahlung wahrzunehmen. Im Test hat sich gezeigt, dass das Bild der Kamera relativ grau ist, was darauf hindeutet, dass alle Subpixel ungefähr gleich empfindlich auf Infrarotlicht reagieren.

Insgesamt haben wir folgende Kameras getestet:

- USB-Kamera „Trust Spotlight Webcam Pro“
- analoges Kameramodul „Sharp 540TV“
- analoges Kameramodul „Sony 600TV“
- USB-Kamera „Conrad 150WS HD Webcam 720p“

#### 3.1.1 Vorbereitungen

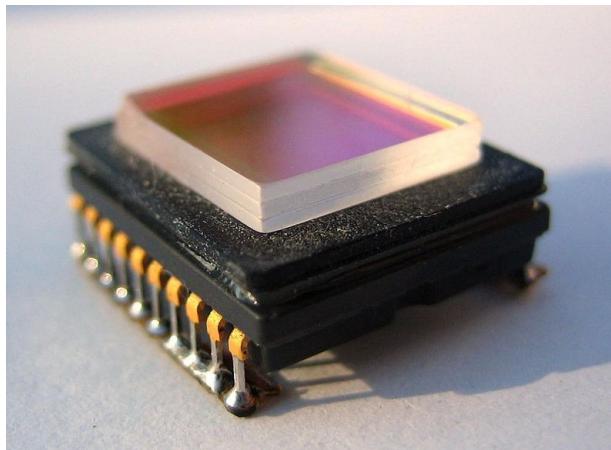


Abbildung 7: CCD-Bildsensor mit Infrarot-Sperrfilter

Die USB-Kameras bestechen durch ihre einfache Handhabung, während die analogen Kameramodule laut deren Datenblättern über eine sehr hohe Lichtempfindlichkeit verfügen. Die USB Kameras haben wir direkt angeschlossen, die beiden analogen über einem USB-Videograbber.

Mit Hilfe einer Lötstation mit digitaler Temperaturregelung konnten wir Bilder in einem Temperaturbereich von 350°C bis 450°C aufnehmen. Als Aufnahmeprogramm haben wir das Programm „GTK UVC video viewer“ genutzt, da es die Möglichkeit bietet, wichtige Einstellungen der Kameras zu verändern.





Abbildung 8: Versuchsaufbau 2, LötKolben bei 350°C

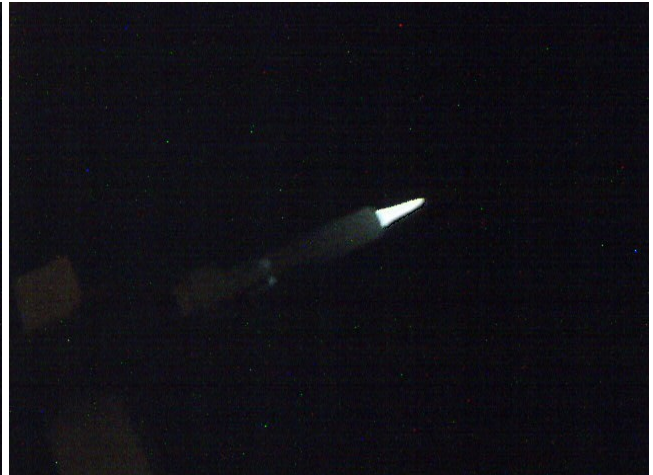


Abbildung 9: LötKolben bei 400°C

### 3.1.2 Auswertung

Mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogramms haben wir den Farbwert der Pixel im Bereich der Lötspitze ermittelt und die Rot-, Grün- und Blauanteile in Dezimalwerte umgerechnet. Zur Verbesserung der Genauigkeit haben wir je drei Bilder pro Temperatureinstellung aufgenommen und einen Mittelwert gebildet. 0 ist die minimale Aussteuerung, 255 die maximale. Zusätzlich haben wir aus den Dezimalwerten der Rot-, Grün- und Blauanteile ein arithmetisches Mittel gebildet. Die Messwerttabellen finden sich im Anhang. Es ergeben sich folgende Diagramme:

#### Temperatur-Aussteuerungs-Diagramm

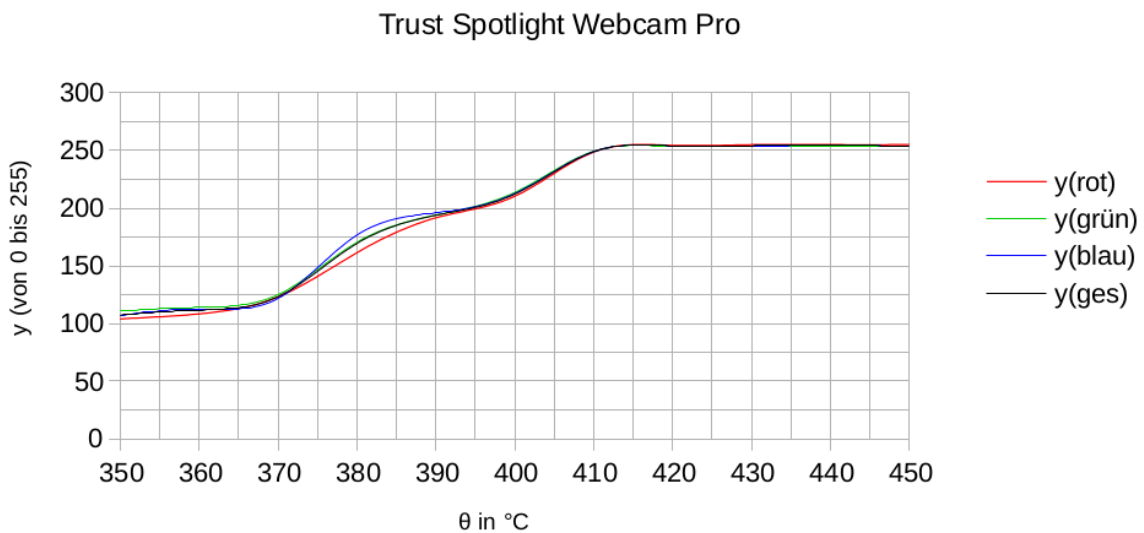


Abbildung 10:  $\theta$ -y-Diagramm: Trust Spotlight Webcam Pro

Bei der USB-Kamera unterscheiden sich die Farbanteile teilweise, dies ist aber genau so wie die Abstufungen des Graphen  $y_{ges}$  auf den vermutlich minderqualitativen Bildsensor zurückzuführen.

## Temperatur-Aussteuerungs-Diagramm

### Sharp 540TV

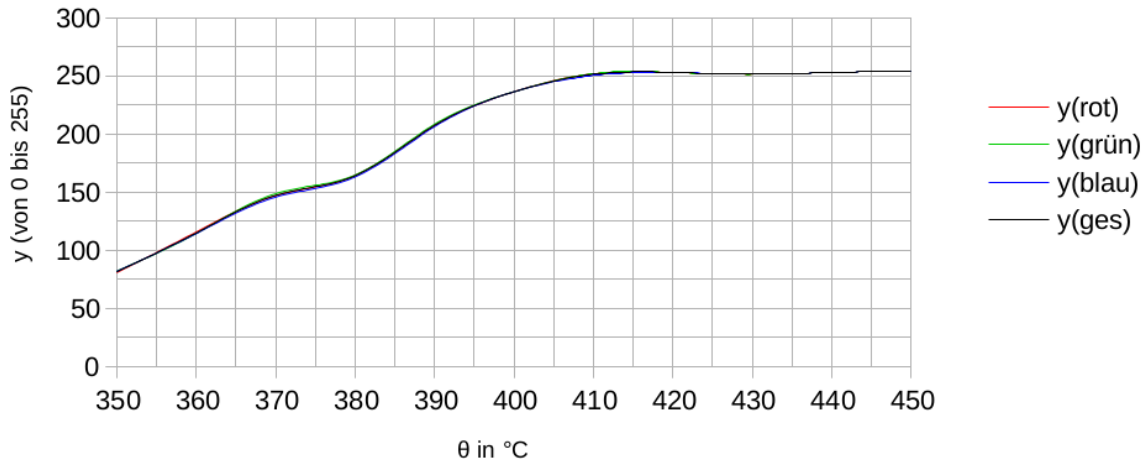


Abbildung 11:  $\theta$ - $y$ -Diagramm: Sharp 540TV

## Temperatur-Aussteuerungs-Diagramm

### Sony 600TV

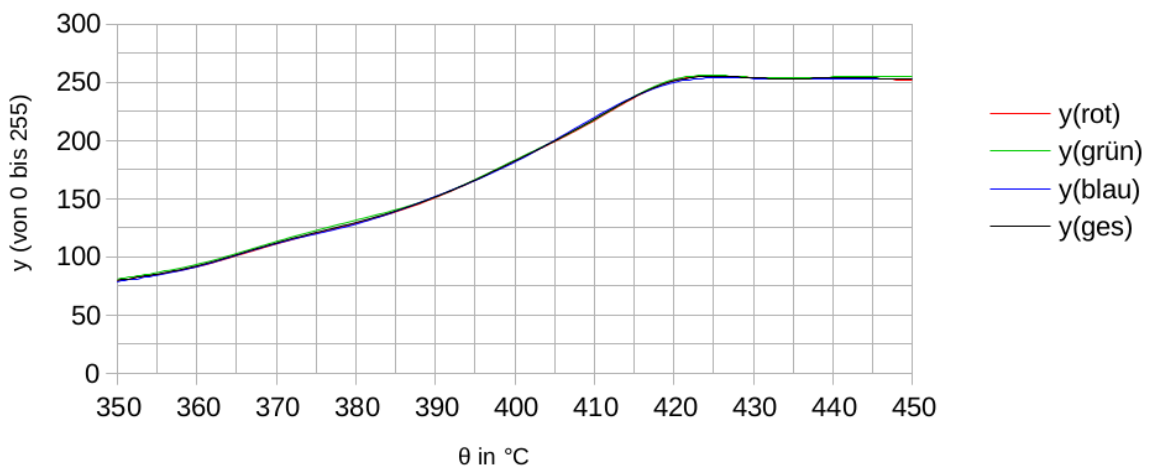


Abbildung 12:  $\theta$ - $y$ -Diagramm: Sony 600TV

Bei geringer Umgebungshelligkeit fielen die beiden Kameramodule in einen Schwarz-Weiß-Modus. Die Aussteuerungen der beiden Kameramodule sind zumindest im Bereich von  $350^{\circ}\text{C}$  bis ungefähr  $410^{\circ}\text{C}$  annähernd linear. Ab ungefähr  $410^{\circ}\text{C}$  werden die Kurven flacher, da die Kameramodule beginnen zu übersteuern. Ab ungefähr  $420^{\circ}\text{C}$  ist die maximale Aussteuerung erreicht. Unter  $350^{\circ}\text{C}$  konnten wir keine sinnvollen Messungen durchführen, da Hintergrundrauschen und Objekt kaum noch zu unterscheiden waren.

Bei der Sharp 540TV gibt es bei 375°C eine kleinere Abstufung. Wir vermuten, dass dies durch eine automatische Belichtungseinstellung des Kameramoduls hervorgerufen wird. Aufgrund dessen, dass die Bayermaske bei den Farbkameras nach wie vor im Sensor verbaut ist, ist davon auszugehen, dass nach wie vor IR-Strahlung absorbiert wird, da eine solche Bayermaske (siehe 3.1.1) für VIS ausgelegt ist.

### 3.2 Messreihen mit Spektrometer

Um ein geeignetes Filtermaterial zu finden, welches möglichst viel sichtbares Licht absorbiert und möglichst viel Infrarotstrahlung hindurch lässt, haben wir verschiedene Messungen mit einem Spektrometer durchgeführt.

Als Lichtquelle haben wir eine 40W-Glühlampe verwendet. In ungefähr 30cm Entfernung haben wir eine Probe des jeweiligen Filtermaterials aufgestellt, dahinter den optischen Eingang des Spektrometers.

Um ein geeignetes Filtermaterial zu finden, haben wir unter anderem mit der Magnetfolie einer Diskette, einem Stück unbelichteten Films und diversen Glasteilen aus defekten DVD-Laufwerken experimentiert.

Aus Interesse haben wir auch das Spektrum eines Infrarot-Sperrfilters aufgenommen. Einige Messungen haben wir in folgendem Diagramm zusammengefasst:

#### Wellenlängen-Intensitäts-Diagramm

mit 40W-Glühlampe als Referenz

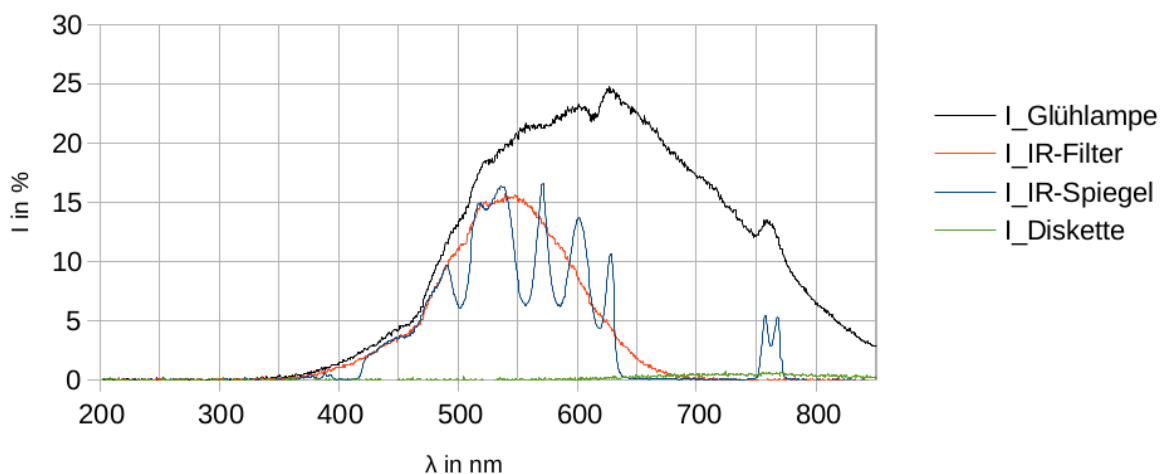


Abbildung 13: Spektren des IR-Sperrfilters, eines Spiegels und einer Diskette im Vergleich zu einer 40W-Glühlampe

### 3.3 Berechnungen

Um ungefähr abschätzen zu können, wie viel Strahlungsenergie bei den Experimenten mit den Kameras auf dem Bildsensor ankommt, haben wir eine Berechnung auf Grundlage der genannten Gesetze durchgeführt:

gegebene Daten:

- Fläche der Heizplatte:  $A_{\text{Heiz}} \approx 0,0072 \text{ m}^2$
- Sensorfläche:  $A_{\text{Sens}} \approx 0,00008 \text{ m}^2$
- maximale Temperatur der Heizplatte:  $T_{\text{max}} = 723 \text{ K}$
- messbare Spannung aus der Thermosäule:  $U_{\text{gem}} = 1,8 \text{ mV}$

Zunächst haben wir eine theoretische Berechnung durchgeführt. Um die am Sensor ankommende Strahlungsleistung zu ermitteln, sind wir davon ausgegangen, dass ...

- ... die Heizplatte ein schwarzer Strahler ist.
- ... die Heizplatte Parallelstrahlen abstrahlt.
- ... die Linse der Kamera einen Transmissionsgrad von  $\tau = 0$  hat, also keine Strahlung absorbiert.

$$I_{\text{theor}} = \sigma \cdot T^4 \quad P_{\text{theor Sens}} = A_{\text{Sens}} \cdot I_{\text{gem}}$$

$$I_{\text{theor}} = 5,6703 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot (723 \text{ K})^4 \quad P_{\text{theor Sens}} = \frac{0,00008 \text{ m}^2 \cdot 15494 \text{ W}}{\text{m}^2}$$

$$I_{\text{theor}} = 15000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad P_{\text{theor Sens}} \approx 1,2 \text{ W}$$

Das Ergebnis zeigt, dass die Annahmen falsch sein müssen, da eine Abstrahlungsleistung von 15 Kilowatt pro Quadratmeter unrealistisch sind.

Um ein sinnvolles Ergebnis zu erhalten, haben wir mit einer Thermosäule in rund 30 cm Entfernung zur Heizplatte die Strahlungsintensität gemessen. Aus der Berechnungsformel der Strahlungsintensität aus dem Datenblatt der Thermosäule ergibt sich Folgendes:

$$I_{\text{gem}} = 39,7 \frac{U_{\text{gem}} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \quad P_{\text{gem Sens}} = A_{\text{Sens}} \cdot I_{\text{gem}}$$

$$I_{\text{gem}} = \frac{1800 \mu \text{ V} \cdot \text{W}}{39,7 \mu \text{ V} \cdot \text{m}^2} \quad P_{\text{gem Sens}} = 0,00008 \text{ m}^2 \cdot 45,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$I_{\text{gem}} = 45,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad P_{\text{gem Sens}} = 0,0036 \text{ W}$$

Unter der Annahme, dass für den Transmissionsgrad der Optik  $\tau = 0$  gilt, haben wir eine auf dem Bildsensor auftreffende Strahlungsleistung von  $P_{\text{Sens}} = 4 \text{ mW}$  errechnet.

## 4 Anwendungsbereiche

Wärmebildkameras können beim Brandschutz und bei der Feuerwehr eingesetzt werden, um nach Bränden und Glutnestern zu suchen. Sie finden auch bei kontaktlosen Temperaturprüf- und Messverfahren Verwendung. Auch bei der zerstörungsfreien Prüfung werden sie angewendet, da sich z.B. defekte mechanische oder elektronische Bauelemente oft stark erwärmen. Weiterhin werden Infrarotkameras für die Suche nach Personen und für die (Fern-) Aufklärung von Polizei und Militär verwendet (Abb. 14).



Abbildung 14: liegender Mensch in einem Motorboot



Abbildung 15: Überwachungskameras der Bundeswehr mit Infrarotscheinwerfer

Eine relativ unbekannt und mittlerweile doch relativ verbreitete Verwendung von Infrarotkameras ist die Suche nach Schädlingsbefall auf Feldern und in Wäldern. Dieses Verfahren beruht darauf, das Chlorophyll Infrarotstrahlung reflektiert und sich dies mit Krankheitszustand der Blätter ändert. Auch kam uns die Idee, unsere infrarot sensitiven Kameramodule in einer selbst gebauten Infrarotkamera einzusetzen. Da aber unsere aktuellen Module relativ unempfindlich sind, also kaum mittlere und keine ferne Infrarotstrahlung wahrnehmen, müsste der gefilmte Bereich ausgeleuchtet werden.

Überwachungskameras, die auch im Dunkeln „sehen“ können, sind eine der verbreitetsten Anwendungen von Infrarotkameras. Das Licht des Infrarotstrahlers, der zum für den Menschen unsichtbaren Ausleuchten des Kamerasichtfelds gedacht ist, ist selbst mit bloßem Auge als schwaches violette Leuchten wahrzunehmen (Abb. 15).

## 4.1 Nachtsichtgerät Eigenbau

Um den praktischen Nutzen unserer Ideen zu testen, haben wir ein einfaches Nachtsichtgerät gebaut.

Technische Daten:

- Kameramodul: Sharp 500TV
- Scheinwerfer: 50 Infrarot-LEDs, 940nm
- Anzeige: analoger Sucher
- Akku: 11,1 V; 4,5 Ah

Das Nachtsichtgerät ist in drei Module unterteilt:

- Ein Stromversorgungsmodul mit Akku, Sicherungen, Verteilern
- Ein Kameramodul mit zuschaltbarem Infrarotscheinwerfer
- Ein Anzeigemodul

Um unnötige und unhandliche Kabelverbindungen zu vermeiden, werden das Kameramodul und das Anzeigemodul am Stromversorgungsmodul angeschlossen, wobei das Videosignal durch das Stromversorgungsmodul durchgeschleift wird. Zum Verbinden der Module wurde geschirmtes vierpoliges Kabel verwendet. Um Brummschleifen und somit Störungen des Videosignals zu vermeiden, sind die Masseleitungen der Betriebsspannung und des Videosignals getrennt ausgeführt. Deshalb sind vierpolige Stecker notwendig. Vierpolige DIN-Rundstecker sind handlich, robust, preiswert und damit gut geeignet.

Am Stromversorgungsmodul ist auch eine Cinchbuchse eingebaut, um das Videosignal der Kamera auch anderweitig auszuwerten. Hier kann zum Beispiel ein Videograbber angeschlossen werden um das Gesehene mitzuschneiden. Zum Aufladen des Akkus ist eine Hohlsteckerbuchse verbaut.

Im Kameramodul haben wir das Kameramodul „Sharp 500 TV“ von Conrad Electronic verwendet. Um den Sichtbereich angemessen auszuleuchten, haben wir 50 Infrarot-LEDs in Gruppen zu je vier Stück in Reihe mit je einem Vorwiderstand parallel über einen Wippschalter angeschlossen. Somit lässt sich der Scheinwerfer ausschalten um die Akkus zu schonen.

Das Anzeigemodul besteht hauptsächlich aus dem Sucher eines alten Video-8-Camcorders. Die Betriebsspannung der Ansteuerungselektronik wird von einem Linearregler LM7805 in Standardbeschaltung bereitgestellt.

Tests mit unserem aus drei Modulen bestehenden Gerät haben gezeigt, dass sich das Gerät ohne zugeschaltete IR-Ausleuchtung vor allem für das sogenannte Dämmerungssehen eignet, mit eingeschalteter Beleuchtung ist eine Sichtweite von etwa 15 Metern problemlos möglich.

#### 4.1.1 Vergleich mit einer Bildverstärker-Röhre

Um einen Vergleich zwischen einem professionellen Nachtsichtgerät und dem unseren durchzuführen, haben wir ein Nachtsichtgerät der ehemaligen Nationalen Volks Armee der Deutschen Demokratischen Republik aus dem Jahre 1962, Typ PNW-57 beschafft. Um in nächtlicher Dunkelheit etwas sehen zu können, muss die Umgebung bei beiden Geräten ausgeleuchtet werden. Dazu verwendeten wir den Scheinwerfer unseres eigenen Nachtsichtgerätes. Das Resultat dieses Tests ist hier zu sehen:



*Abbildung 16: Sicht durch das NVA-Gerät*



*Abbildung 17: Sicht durch unser Gerät*

Die Sicht durch Bildverstärkerröhren ist immer grünstichig, da nach der Bildverstärkerröhre ein Phosphorbildschirm folgt, auf den die verstärkte Strahlung (vor allem VIS und IR) projiziert wird und der die Infrarotstrahlung erst sichtbar macht. Jedoch ist die Sicht durch unser Gerät eindeutig klarer.

#### 4.1.2 Vergleich mit einer Wärmebildkamera

Um die Güte unseres Gerätes für thermographische Messungen zu testen, haben wir eine Herdplatte bei einer Temperatur von etwa 380°C sowohl mit einem professionellem Wärmebildgerät, der „*NEC Avio Thermo Shot F30*“, als auch mit einer unserer Kameras, der „*Conrad 150WS HD Webcam 720p*“, betrachtet und fotografiert.

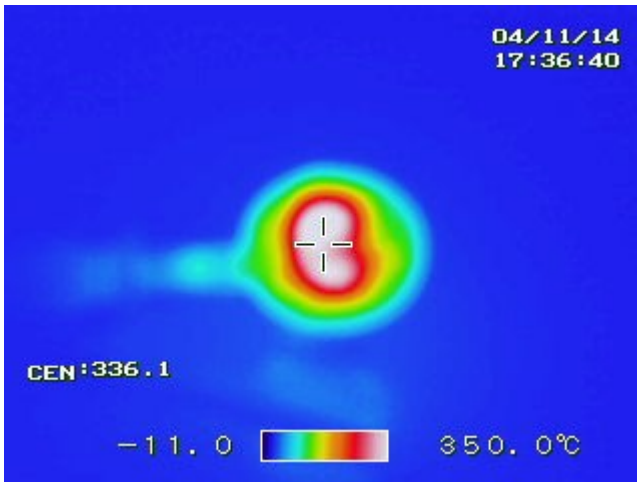


Abbildung 18: Sicht durch eine Wärmebildkamera

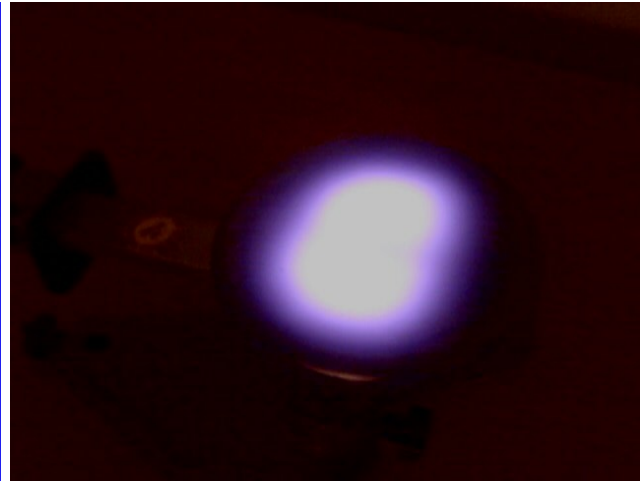


Abbildung 19: Sicht durch unser Gerät

Es ließ sich erkennen, dass unsere Kameras ausschließlich für den Gebrauch innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs geeignet sind, welcher sich aus den obigen Temperatur-Aussteuerungs-Diagrammen ableiten lässt und zwischen 350°C und 400°C bis zu 420°C liegt. Nur in diesem Bereich sind unsere Kameras überhaupt in der Lage, Wärmestrahlung wahrzunehmen. Die Qualität dieser Aufnahmen ist allerdings nicht mit professionellen Aufnahmen vergleichbar (wie an obigen Bildern zu sehen ist).

Innerhalb dieses Messbereichs sind unsere Kameras für thermografische Aufnahmen also nur beschränkt nutzbar und außerhalb des genannten Bereichs gänzlich ungeeignet.



## 5 Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die im Abbildungs- und Literaturverzeichnis angegebenen Hilfsmittel verwendet haben. Insbesondere versichern wir, dass wir alle wörtlichen und sinngemäßen Übertragungen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht haben (siehe dazu die Erläuterung zur Quellensystematik im nächsten Abschnitt).

---

Pablo Grimm  
Berlin, der 14.11.2014

---

Niklas Schmidt

## 6 Abbildungs- und Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung, DIN. 5031-7, Benennung der Wellenlängenbereiche
- [2] Metzler Physik – Kapitel Thermodynamik, Strahlungsgesetze – Seite 180, 181 – ISBN 3-507-10700-7 – 3. Auflage 2003 – Schroedel Verlag
- [3] Naturwissenschaft und Technik – Schall Bild Optik – Kapitel Anwendungsgebiete der Fotografie – Seiten 107, 108 – Zweiburgen Verlag – Sonderausgabe 1991
- [4] <http://de.infratec.eu/thermografie.html>
- [5] <http://www.infratec.de/de/thermografie/thermografie-wissen/theorie.html>
- [6] Weißt du, wie viel Sterne stehen? – Wie das Licht in die Welt kommt – Harald Lesch und Jörn Müller – Seite 49 – ISBN 978-3-570-01054-9 – Kapitel 4 – C. Bertelsmann Verlag – 2. Auflage 2008
- [7] [www.micro-epsilon.de/glossar/Bolometer.html](http://www.micro-epsilon.de/glossar/Bolometer.html)

Die Abbildungen sind in der obigen Arbeit jeweils mit ihrer Nummer und einem Kommentar bezeichnet. Zu diesen Nummern sind im Folgenden die Quellen aufgelistet.

Abbildung 1: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Spectre.svg>, bearbeitet

Abbildung 2: Metzler Physik Abbildung 168.1 auf Seite 168

Abbildung 3: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/Bolometer\\_conceptual\\_schematic.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/Bolometer_conceptual_schematic.svg), bearbeitet

Abbildung 4: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Schema\\_-\\_n-dotiertes\\_Silicium.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Schema_-_n-dotiertes_Silicium.svg), bearbeitet

Abbildung 5: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/Schema\\_-\\_p-dotiertes\\_Silicium.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/Schema_-_p-dotiertes_Silicium.svg), bearbeitet

Abbildung 6: Meteum, bearbeitet

Abbildung 7: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:IR.Lowpass.Filter.CCD.jpg>

Abbildung 14: Massachusetts State Police, 19. April 2013, Boston, USA

Alle Internetquellen waren am 30. Oktober 2014 um 13:16 abrufbar.

Das Titelbild und die Abbildungen 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 wurden selbst erstellt bzw. aufgenommen.

## 7 Anhänge

Abbildungen der drei Module unseres selbstgebauten Nachtsichtgeräts.



Abbildung 20: Modul 1



Abbildung 21: Modul 2



Abbildung 22: Modul 3

Im folgenden sind unsere Messwerttabellen zu unseren Versuchen mit dem LötKolben zu finden. Die dazugehörigen Diagramme finden sich unter 3.1.2 auf Seite 9 ff.

„Conrad Trust Spotlight Webcam“

$\theta$ in °C	Rot			Grün			Blau		
300	32	12	30	30	22	22	41	34	46
310	19	23	31	23	23	28	24	21	35
320	45	35	30	37	30	34	61	36	37
330	44	39	40	34	44	46	59	50	46
340	42	50	69	51	49	68	50	57	76
350	111	97	-	115	107	-	118	96	-
360	96	114	115	97	125	120	101	111	126
370	125	132	112	132	144	99	125	124	116
380	142	170	172	138	185	188	155	188	187
390	184	190	201	186	191	205	185	195	208
400	189	215	227	194	215	232	197	213	228
410	237	254	255	239	254	255	238	255	254
420	-	255	254	-	255	252	-	255	253
430	255	255	255	254	254	254	255	253	253
440	255	255	255	254	254	253	255	255	254
450	255	255	255	254	254	253	253	255	253

„Sharp 540TV“:

T in °C	Rot			Grün			Blau		
350	84	79	79	86	80	80	85	84	76
360	114	110	123	112	110	121	113	108	122
370	147	149	145	148	151	147	144	147	146
380	171	157	165	171	158	165	171	153	165
390	207	210	205	207	211	207	205	210	204
400	230	244	235	230	244	235	232	244	233
410	253	248	255	253	248	255	251	246	254
420	254	252	253	254	252	253	254	252	253
430	253	248	253	253	248	253	253	248	253
440	252	254	253	252	254	253	252	254	253
450	254	253	254	254	253	254	254	253	254

Sony 600TV:

T in °C	Rot			Grün			Blau		
350	73	83	83	73	82	87	70	84	81
360	94	89	91	95	93	92	91	92	91
370	116	109	108	121	107	111	117	107	110
380	134	127	125	136	131	127	131	127	126
390	161	148	143	163	148	143	165	149	141
400	178	184	185	178	183	188	178	179	187
410	226	223	202	223	225	205	224	222	213
420	251	251	252	252	251	254	247	252	250
430	254	254	254	254	254	254	254	252	254
440	254	254	253	254	254	255	254	254	250
450	249	253	253	253	255	255	252	254	253