

## Praktikum

**Bestimmung des  
Oberflächentemperaturfeldes  
und des Emissionsgrads einer  
Modellfassade mit einer**

**Infrarot-Kamera**

## 1. Grundlagen

Körper senden je nach ihrer Temperatur elektromagnetische Strahlung aus. Mit geeigneten Detektoren lässt sich diese Eigenschaft zur berührungslosen Temperaturmessung ausnutzen. In Bild 1 ist das elektromagnetische Spektrum dargestellt. Der bei Thermographie-Messungen genutzte Bereich liegt hauptsächlich zwischen 8 und 14  $\mu\text{m}$ .

Das Plancksche Strahlungsgesetz gibt die Intensitätsverteilung der Strahlung über den Wellenlängenbereich im Vakuum an.

$$s(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (1)$$

$s(\lambda, T)$  = spektrale Strahlungsintensität in  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$   
 $\lambda$  = Wellenlänge in  $\mu\text{m}$   
 $T$  = Temperatur in K  
 $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  in  $\text{W} \cdot \text{m}^2$   
 $C_2 = 14,387 \cdot 10^{-3}$  in  $\text{m} \cdot \text{K}$

Integriert man über den Wellenlängenbereich, erhält man die gesamte spezifische Strahlungsleistung (Stefan-Boltzmann'sches Gesetz).

$$S(T) = \sigma \cdot T^4$$
$$\sigma = 5,668 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad \text{Stefan-Boltzmann-Konstante} \quad (2)$$

Die Wellenlänge bei der die maximale Strahlungsleistung erfolgt, erhält man mit dem Wien'schen Verschiebungsgesetz.

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2900}{T} \text{ in } \mu\text{m} \quad (3)$$

Wie aus Bild 2 ersichtlich, liegen die Wellenlängenmaxima bei Temperaturen zwischen 300 und 800 K zwischen 10 und etwa 4  $\mu\text{m}$ .

Elektromagnetische Strahlung kann von einem Körper absorbiert, emittiert oder reflektiert werden. Ist der Transmissionsgrad eines Körpers für eine bestimmte Wellenlänge größer 0, so ist er für elektromagnetische Strahlung dieser Wellenlänge durchlässig (transparent).

Für Absorptionsgrad  $\alpha$ , Reflexionsgrad  $\rho$ , und Transmissionsgrad  $\tau$  gilt:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (4)$$

**Bestimmung des Oberflächentemperaturfeldes und des Emissionsgrads einer Modellfassade mit einer Infrarot-Kamera**

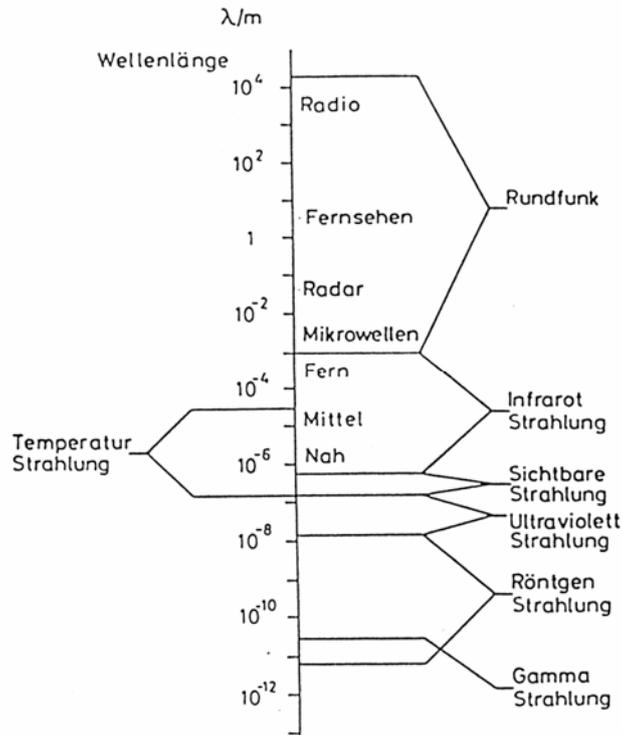


Bild 1: Elektromagnetisches Spektrum

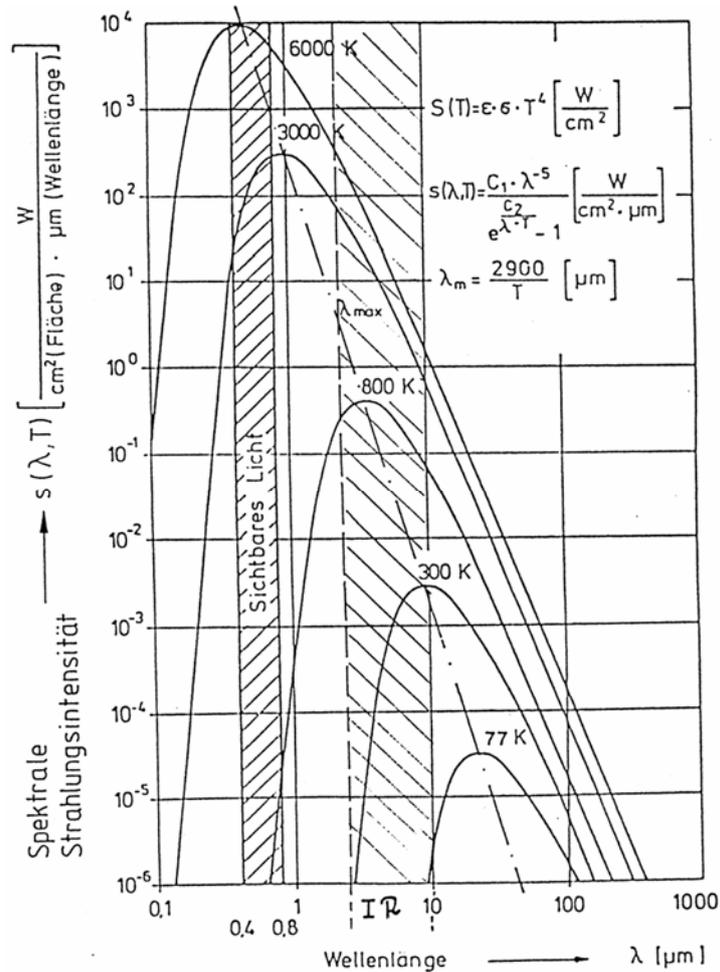


Bild 2: Planck'sche Kurvenschar

## Bestimmung des Oberflächentemperaturfeldes und des Emissionsgrads einer Modellfassade mit einer Infrarot-Kamera

---

Man nennt einen Körper schwarz, wenn  $\alpha = 1$  für alle Wellenlängen ist. Analog heißt ein Körper weiß, wenn  $\rho = 1$  ist, er also alle Strahlung reflektiert.

Ist  $0 < \alpha < 1$  nennt man einen Körper grau. Beispiele für den Emissionsgrad  $\varepsilon$  sind in Bild 3 dargestellt.

Wie sich anhand des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik überlegen lässt, muss gelten

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (\text{Kirchhoffsches Gesetz})$$

$\varepsilon$  wie  $\alpha$  sind meist wellenlängenabhängig (Bild 4). Dies nutzt man z. B. bei der Produktion so genannter selektiver Schichten für die Solartechnik aus, die im sichtbaren Bereich (Maximum der Solarstrahlung) einen Absorptionsgrad nahe 1 besitzen und im infraroten Bereich ( $\lambda > 4 \mu\text{m}$ ) einen möglichst niedrigen Emissionsgrad (und Absorptionsgrad) besitzen ( $\varepsilon < 0,1-0,2$ ).

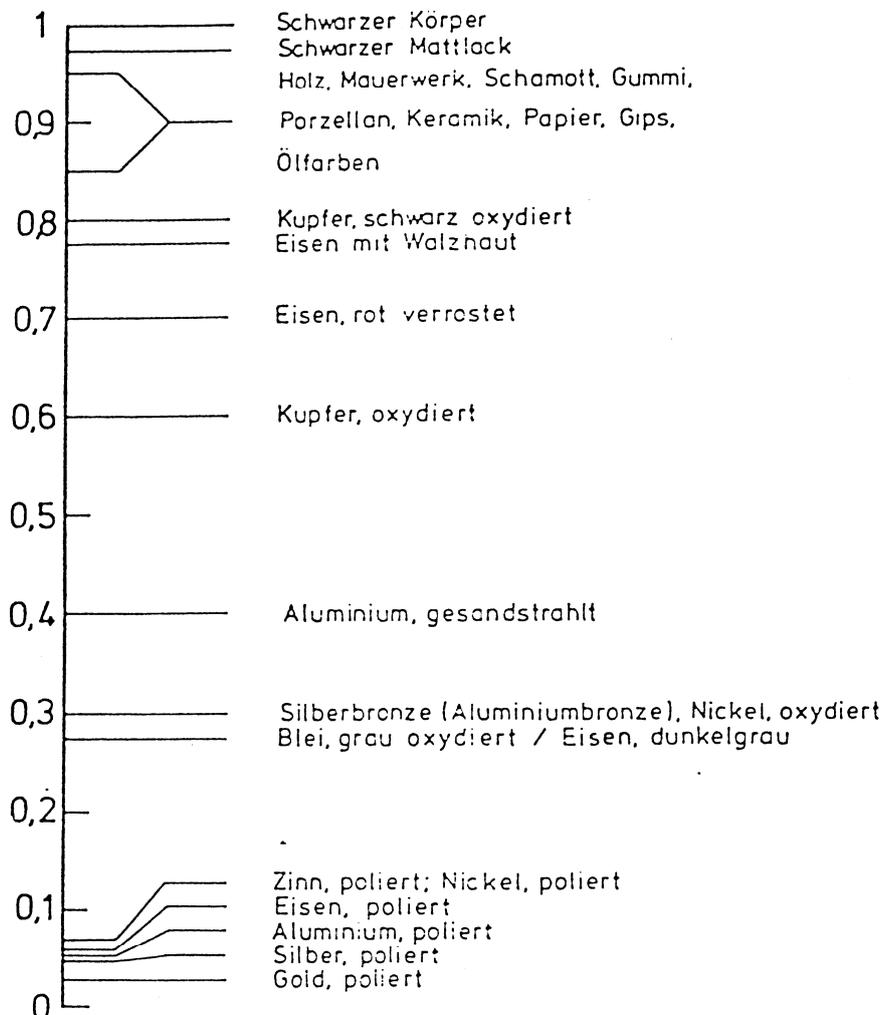


Bild 3: Emissionsgrad realer Körper

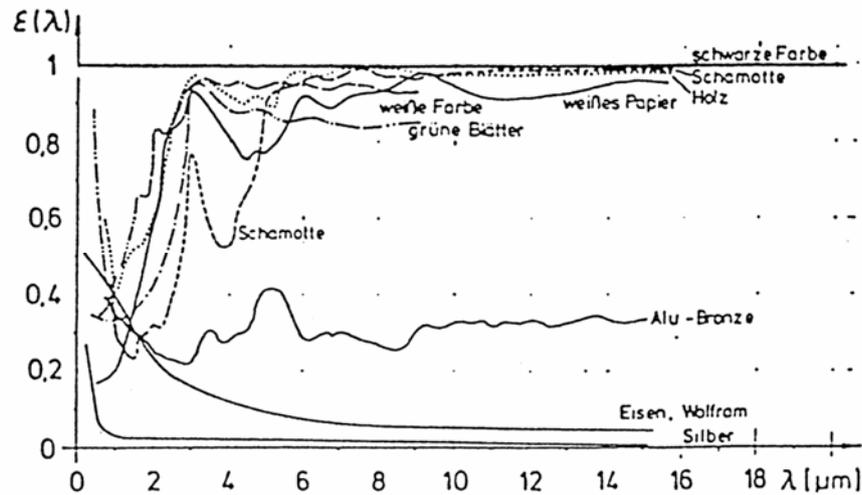


Bild 4: Spektraler Emissionsgrad

**Anwendungsbereiche** der Infrarot-Thermographie sind:

- \* Bauwirtschaft: Detektion von Wärmebrücken, Durchfeuchtungen
- \* Haus- und Klimatechnik: Ortung elektrischer Leitungen
- \* Energiewirtschaft: Analyse des Zustandes von Fernwärmeleitungen
- \* Industrielle Anwendungen: zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Brandüberwachung
- \* Umweltanalytik: Altlastenerkundung, Deponieerkundung.

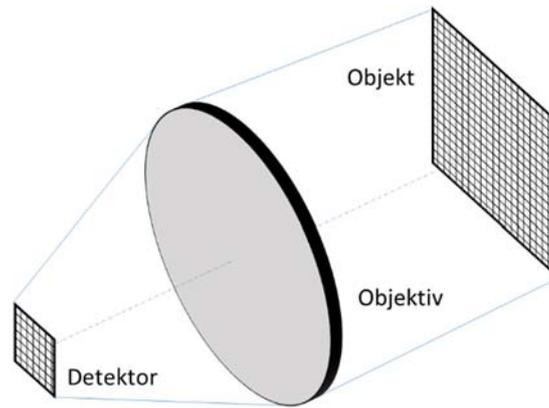
## 2. Funktionsprinzip der Infrarot-Kamera

In diesem Praktikum wird das Thermografiesystem (IR-Kamera) VarioCam® high resolution der Firma InfraTec eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes FPA-System (Focal Plane Array), bei dem nicht ein, sondern eine Vielzahl von Strahlungssensoren im Detektor verwendet werden. Das bietet die Möglichkeit auf eine mechanische Strahlungsführung innerhalb der IR-Kamera, wie sie beispielsweise bei Scanner-IR-Kameras mit nur einem Sensor benötigt wird, zu verzichten. Die zentralen Komponenten des Thermografiesystems VarioCam® high resolution sind

- das Objektiv,
- der Detektor,
- die Elektronik
- und die Software.

Die von dem zu vermessenden Objekt ausgesandte IR-Strahlung wird mithilfe des Objektivs auf den Detektor projiziert. Dies ist schematisch in Bild 5 gezeigt. Der detektierte Wellenlängenbereich liegt zwischen 7,5  $\mu\text{m}$  und 14  $\mu\text{m}$ .

Die Elektronik übernimmt verschiedene Aufgaben (Steuersignale des Detektors, Echtzeitbildverarbeitung,...), im Wesentlichen dient sie jedoch dazu, die einzelnen Sensor-Signale des Detektors zu erfassen und zu digitalisieren. Diese Daten können im Anschluss mit dem Thermografiesystem selbst oder, wie im Rahmen dieses Praktikums, mit einer Software (IRBIS® 3 plus) ausgewertet werden.



**Bild 5: Schematische Strahlführung in einer FPA-Kamera**

Abbildung in Anlehnung an die Quelle: [InfraTec GmbH - Einführung in die Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie, 2004]

Als Detektor wird ein ungekühlter Mikrobolometer-FPA-Detektor mit 384 x 288 Bildpunkten verwendet. Die einzelnen Sensoren dieses Detektors sind auf Membranen aufgebraute Dünnschichtwiderstände. Diese erfahren durch die einfallende IR-Strahlung eine Temperaturänderung, welche von der Elektronik erfasst und verarbeitet wird.

Die Temporauflösung beträgt bei einer Objekttemperatur von 30 °C weniger als 0,03 K. Der Temperaturmessbereich liegt zwischen -40 °C und 600 °C. Die absolute Temperaturmessgenauigkeit beträgt ±1,5 K im Messbereich von 0 °C bis 100 °C bzw. ±2 % für Temperaturen kleiner als 0 oder größer als 100 °C.

Die in diesem Kapitel zusammengefassten Informationen sind inhaltlich den Quellen [InfraTec GmbH - Einführung in die Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie, 2004] und [InfraTec GmbH – Benutzerhandbuch VarioCAM@high resolution inkl. Softwarebeschreibung IRBIS® remote 3.0, Stand: November 2012] entnommen.

### **3. Temperaturmessung mit der Infrarotkamera**

Die von der Infrarot-Kamera aufgenommene Strahlungsleistung setzt sich zusammen aus:

- der Eigenstrahlung des Messobjektes
- der am opaken Messobjekt reflektierten Strahlung (Umgebung)
- der Eigenstrahlung der Luftstrecke

$$S_{ges} = \varepsilon_0 \cdot \tau_p \cdot S(T_0, \lambda) + (1 - \varepsilon_0) \cdot \tau_p \cdot S(T_A, \lambda) + (1 - \tau_p) \cdot S(T_p, \lambda)$$

Bei kurzen Entfernungen von Messobjekt und Kamera kann der Störeinfluss der Umgebung vernachlässigt werden  $\Rightarrow \tau_p = 1$ . Ebenso sollten Reflexionenquellen in der Umgebung möglichst gut abgeschirmt werden, sodass die aufgenommene Strahlung lediglich vom Messobjekt selbst abhängt.

- $\lambda$  Wellenlänge
- $\varepsilon_0$  Emissionsgrad des Objektes
- $\tau_p$  Transmissionsgrad des Pfades (Strecke zwischen Objekt und Kamera)
- $S$  Strahlungsleistung
- $S_{ges}$  Strahlungsleistung auf die Kamera
- $T_A$  Umgebungstemperatur
- $T_0$  Objekttemperatur
- $T_p$  Pfadtemperatur

## Bestimmung des Oberflächentemperaturfeldes und des Emissionsgrads einer Modellfassade mit einer Infrarot-Kamera

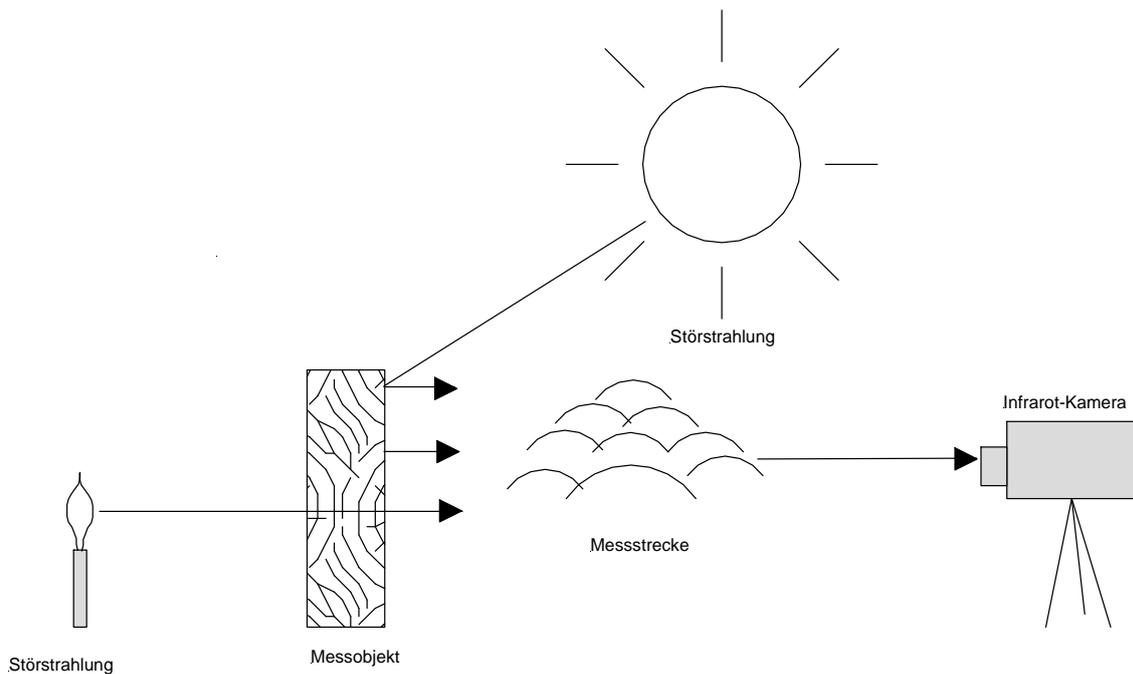


Bild 6: Störeinflüsse auf das Messergebnis

**Anmerkung:** Die Umgebungstemperatur ist nicht gleich der Lufttemperatur, sondern die Temperatur, die die Kamera „sieht“, siehe Bild 7. Es ist die mittlere Temperatur auf der Innenfläche des die Messoberfläche umgebenden Halbraumes.

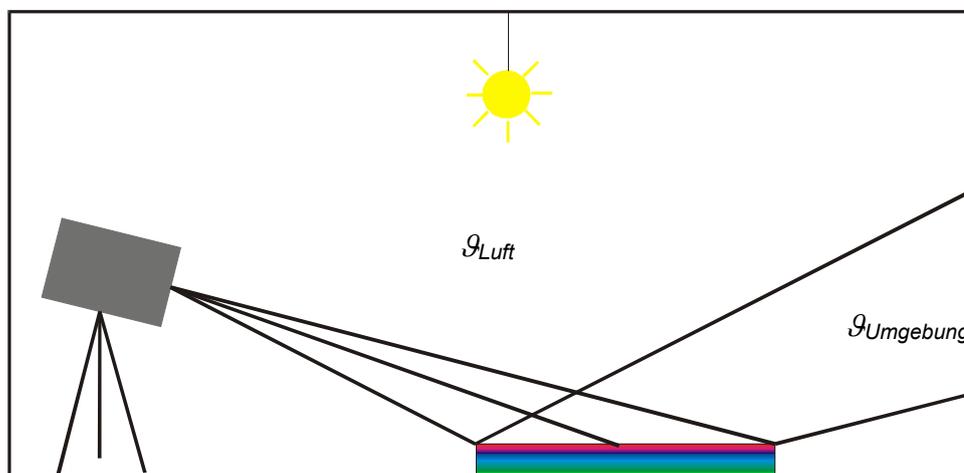


Bild 7: Umgebungstemperatur

Die Auswerteeinheit der Kamera berücksichtigt neben intern festgelegten Parametern folgende Parameter, die vom Nutzer eingegeben werden müssen:

- Emissionsgrad und Entfernung des Messobjekts
- Transmission und Temperatur der Luft (Pfadtemperatur)
- Temperatur der Umgebung

#### 4. Durchführung der Versuche

Der Versuchsaufbau, bestehend aus Modellgebäude, Thermoelementen, Eisstelle, Voltmeter und Scanner, ist schematisch in Bild 8 dargestellt. In dem Gebäude befindet sich eine Wärmequelle. Das Modellgebäude besitzt Fassadenelemente aus verschiedenen Materialien (Plexiglas, Glas, Metall und Putz), auf denen Thermolemente zur Messung der Temperatur angebracht sind. Die eingesetzten Thermolemente sind NiCr-Ni-Thermolemente, deren Verschaltung in Bild 9 gezeigt ist.

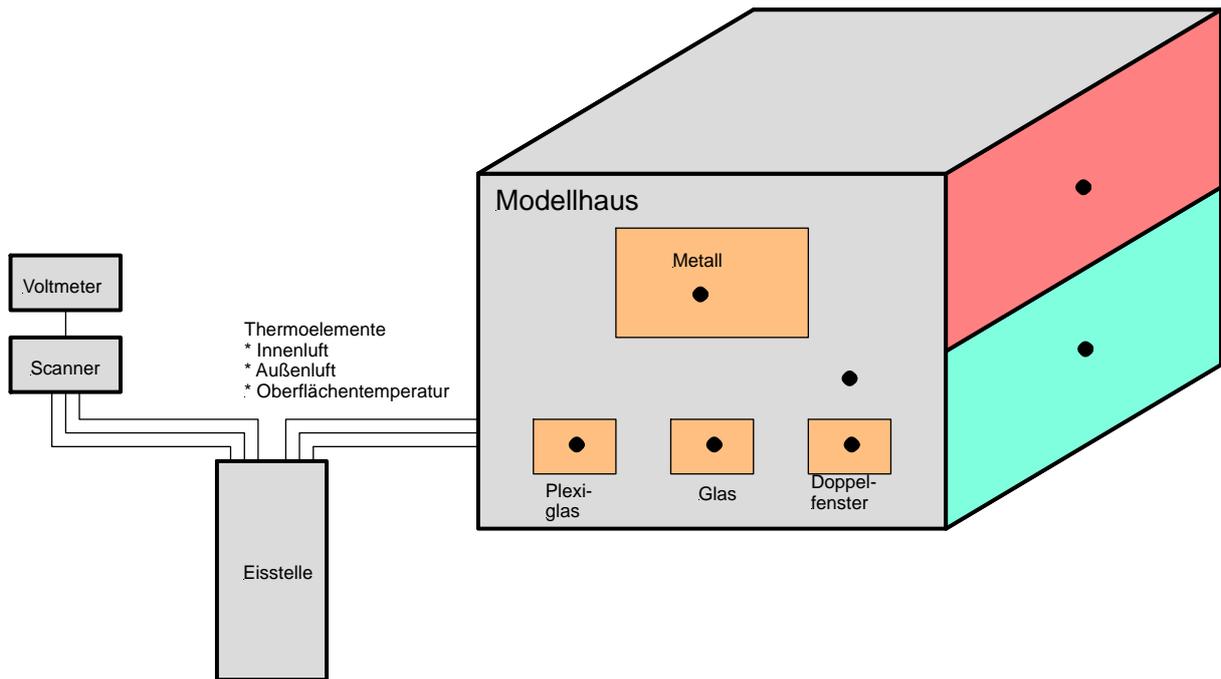


Bild 8: Schema des Versuchsaufbaus

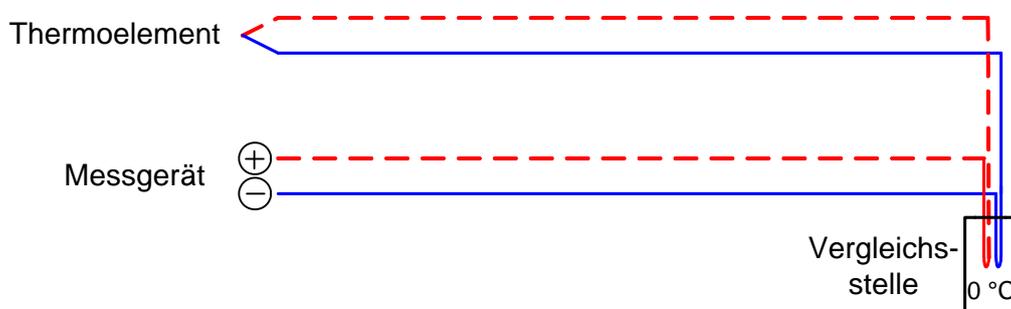


Bild 9: Verschaltung der Thermolemente

### Versuchsablauf:

- **Bestimmung der Temperaturen** an den gegebenen Messpunkten mit **Thermoelementen**. Messung der Spannung und Umrechnung in Temperaturen mit folgender Gleichung:

$$\vartheta = c_0 + c_1 \cdot U + c_2 \cdot U^2 + c_3 \cdot U^3 \quad U \text{ in mV, } \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C}$$

$$c_0 : -1,07792619 \cdot 10^{-2}$$

$$c_1 : 2,69402380 \cdot 10^1$$

$$c_2 : -5,20408476 \cdot 10^{-1}$$

$$c_3 : 1,09901836 \cdot 10^{-1}$$

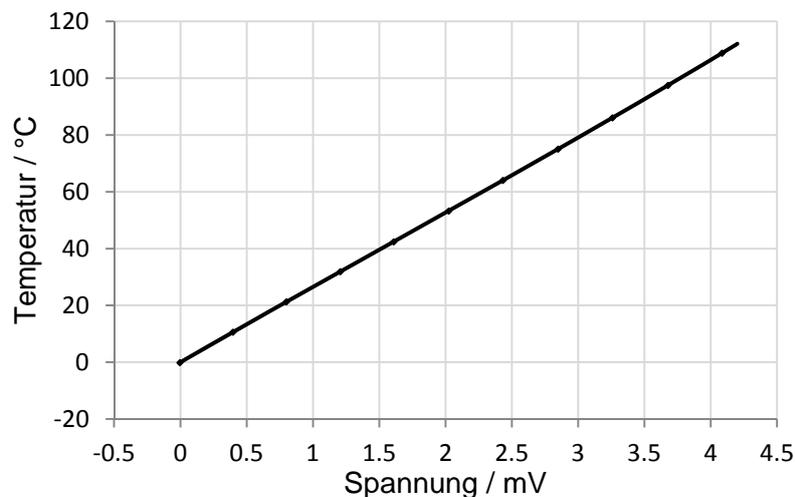


Bild 10: Kalibrierkurve der Thermoelemente

- **Inbetriebnahme** der Kamera und der Software
  - ⇒ PC anschalten ⇒ IRBIS® 3 plus starten
  - ⇒ Kamera einschalten
  - ⇒ IRBIS: Kamera ⇒ Verbinden ⇒ Live
- **Einstellen** der softwareseitigen **Parameter**
  - ⇒ *Emissionsgrad* des zu messenden Objektes
  - ⇒ *Umgebungstemperatur*: Temperatur von Störquellen (der Umgebung), zu beachten wenn Emissionsgrad des Objektes < 1
  - ⇒ *Pfadtemperatur*: Temperatur der Umgebungsluft
  - ⇒ *Transmissionsgrad* der Wegstrecke zwischen Messobjekt und Kamera
  - ⇒ *Entfernung* zwischen Objekt und Kamera
- **Messpunkte** mit der Software auf die Fassadenelemente **platzieren**
- **Einstellung** des angenommenen **Emissionsgrads** an den Messpunkten und ablesen der **Temperatur**
- **Vergleich** der mit dem Thermoelement und der Kamera gemessenen Temperatur. Bei Abweichungen erneutes Einstellen des Emissionsgrads am Messpunkt.

### Messung der Oberflächentemperatur mit Thermoelementen

Thermoelement	Kanal	Bezeichnung	Spannung in mV	Temperatur in °C
2	3	Plexiglas		
3	4	Fassade unten		
4	6	Doppelglas		
5	7	Innenluft		
6	8	Metall		
7	13	Außenluft		
9	15	Fassade oben		
10	16	Fassadenfront		
11	17	Glas		

### Bestimmung der Emissionsgrade der Oberflächen mit der IR-Kamera

Bezeichnung	Emissionsgrad IR-Kamera eingestellt	Temperatur IR-Kamera in °C	
Plexiglas			
Glas			
Doppelglas			
Metall			
Fassadenfront			
Fassade oben			
Fassade unten			

## 5. Aufgaben zur Versuchsauswertung / Aufbau des Protokolls

Das Protokoll ist in einheitlicher Form, ordentlich und gut lesbar (z.B. mit Word erstellt) abzugeben.

- Beschreibung der wichtigsten Grundlagen der Thermographie
- Versuchsdurchführung
- Analyse der Fehlerquellen. Mögliche Fehler/Unsicherheiten der Messwerte
- Messergebnisse (Spannungen, Emissionsgrade, Temperaturen)  
Sind die Messwerte plausibel?
- Fehlerfortpflanzung für Spannungsmessung mit  $\Delta U \cong 0,01 \text{ mV}$  (Hinweise hierzu siehe Anhang) und Angabe der Ergebnisse (Temperatur) mit Fehlern. Diskussion der Ergebnisse. Sind die statistischen Messfehler für die (Un-)Genauigkeit der Messungen ausschlaggebend?
- Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  mit Hilfe der gemessenen Temperaturen für die Frontfassade, die obere und die untere Seitenfassade sowie für die einzelnen Fenster.

Anmerkung: Bei der Berechnung des k-Werts wird üblicherweise nur Wärmeleitung und Konvektion zugrunde gelegt. Prinzipiell kann aber auch ein k-Wert unter zusätzlicher Berücksichtigung der Strahlung berechnet werden.

Die hier zu berechnenden k-Werte sollen nur auf Wärmeleitung und Konvektion bezogen sein.

Als Wärmeübergangskoeffizient auf der Außenseite der Fassade und Fenster ist folgender Wert anzunehmen:

$$\alpha_a = 4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- Berechnung der Gesamtwärmeverluste (obere und untere Seitenfassade, Frontfassade und Fenster) unter Berücksichtigung der Konvektions- und Strahlungsverluste.

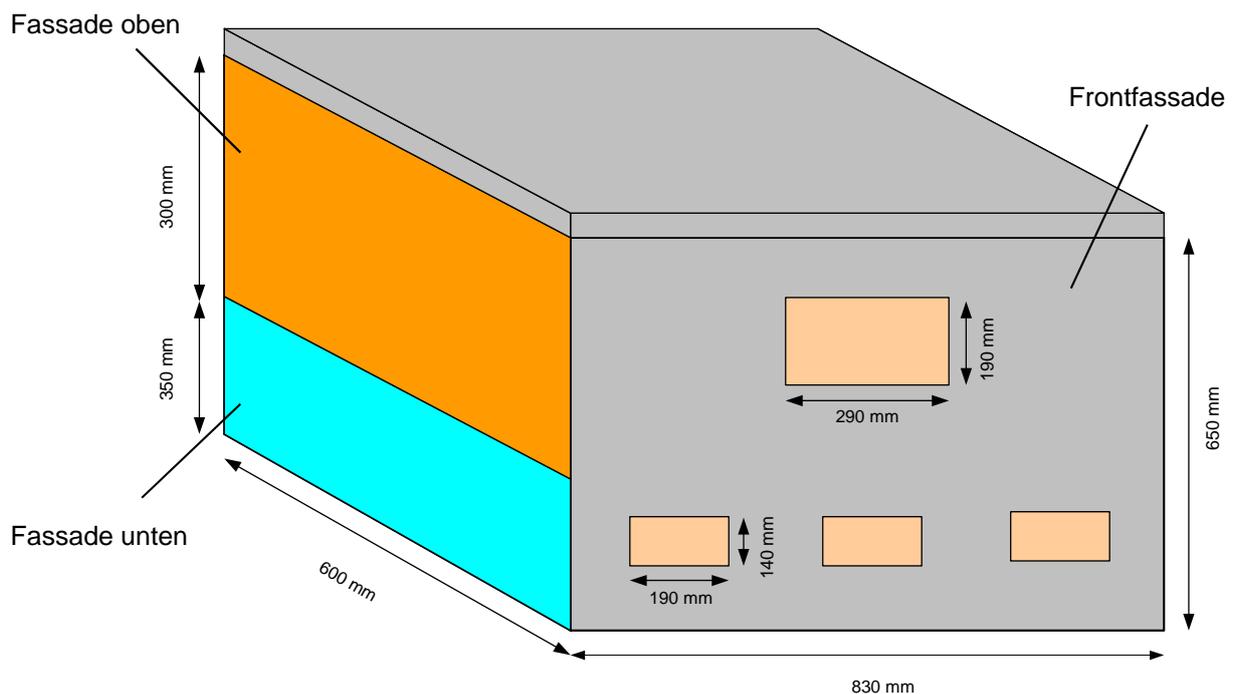


Bild 11: Abmessungen des Modellhauses

- Berechnung der Effektivtemperatur der Sonne:  
Außerhalb der Erdatmosphäre empfängt eine zur Sonne ausgerichtete Fläche eine Bestrahlungsstärke von  $S = 1,3679 \text{ kW/m}^2$ . Man bestimme die Temperatur  $T$  der Sonnenoberfläche unter der Annahme, dass die Sonne in hinreichender Näherung ein schwarzer Körper sei. Der Sonnenradius beträgt  $R = 6,963 \cdot 10^8 \text{ m}$ , der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne ist  $r = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ .

## Anhang

### Fehlerfortpflanzung:

In den meisten Fällen ist die gesuchte Größe ( $z$ ) über einen aus theoretischen Überlegungen bekannten Zusammenhang mit den direkt gemessenen Größen ( $a, b, c, \dots$ ) verknüpft:  $z = f(a,b,c)$ . Für die direkten Messgrößen lassen sich (systematische und statistische) Messfehler angeben:  $\Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots$

Die Fehlertheorie liefert hierfür das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz (Herleitung siehe einschlägige Literatur):

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial a}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial b}\right)^2 \Delta b^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial c}\right)^2 \Delta c^2 + \dots}$$

Die Ergebnisse werden mit den absoluten und/oder den relativen Fehlern angegeben, bei rein statischen Fehlern also:

$$x = x \pm \Delta x \quad \text{bzw} \quad x = x \pm \frac{\Delta x}{x} \text{ (am besten in \%)}$$

Hierbei muss man sich jedoch im Klaren sein, dass alle Fehlerangaben Wahrscheinlichkeitsaussagen und damit selbst fehlerbehaftet sind.