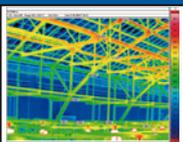
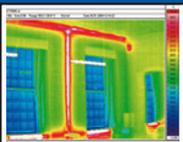
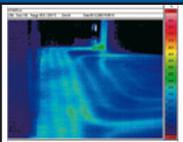
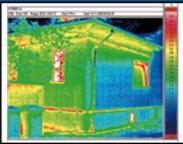


Nabil A. Fouad | Torsten Richter

Leitfaden Thermografie im Bauwesen

Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung

4., überarbeitete und erweiterte Auflage



Fraunhofer IRB  Verlag

Nabil A. Fouad | Torsten Richter

Leitfaden Thermografie im Bauwesen

Nabil A. Fouad | Torsten Richter

Leitfaden Thermografie im Bauwesen

Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung

4., überarbeitete und erweiterte Auflage

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Informationen Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.
ISBN 978-3-8167-8456-2

Layout: Georgia Zechlin

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: Konrad Triltsch Print und digitale Medien GmbH, Johannes-Gutenberg-Straße 1-3,
97199 Ochsenfurt-Hohestadt

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum

Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon (0711) 9 70-25 00

Telefax (0711) 9 70-25 08

E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de

<http://www.baufachinformation.de>

Inhalt

1	Einleitung	9
1.1	Einführung und Problemstellung	9
2	Physikalische Grundlagen der Thermografie	10
2.1	Grundprinzip	10
2.1.1	Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers	11
2.1.2	Strahlungsgesetze realer Körper	15
2.2	Einflüsse durch die Messumgebung	28
2.2.1	Einfluss der Atmosphäre	28
2.2.2	Einfluss der Umgebungs- und Hintergrundstrahlung – Auswertungsgleichung der Thermografie	31
2.2.3	Auswirkungen von Fehleinschätzungen des Emissionsgrads und der Umgebungsstrahlungstemperatur	37
3	Überblick über Thermografiesysteme	46
3.1	Historische Entwicklung	46
3.2	Kameratechnik und Sensorik	47
3.2.1	Scanner-Thermografiesysteme	48
3.2.2	Focal-Plane-Array-Thermografiesysteme	51
3.3	Beurteilungskriterium zur thermischen Auflösung	54
3.4	Optische Elemente – Linsensysteme	54
3.5	Darstellung der Thermogramme, Speicherung und Verarbeitung	57
4	Vorschriften, Richtlinien und Normen	61
5	Genauigkeiten der in Thermogrammen angegebenen Temperaturen ...	63
5.1	Einfluss der Wetterrandbedingungen und der Baualtersklasse von Gebäuden	63
5.1.1	Einfluss der instationären Einwirkungen – Durchschlagen von Temperaturänderungen	69

5.1.2	Berechnung der täglichen Schwankungen der Innenoberflächentemperaturen	70
5.1.3	Einfluss von Fehlstellen in Wärmedämmungen	74
5.2	Einfluss von falsch angenommenen Emissionsgraden und Hintergrundstrahlung auf das Messergebnis	75
5.2.1	Beispiel einer Innenthermografie	75
5.2.2	Beispiel einer Außenthermografie	77
6	Anwendung der Thermografie in der Bautechnik	80
6.1	Grundprinzipien und Messvoraussetzungen	80
6.1.1	Messvoraussetzungen bei Außen- und Innenthermografien	80
6.2	Thermografie zur Lokalisierung von Wärmebrücken	83
6.2.1	Systematik der Wärmebrücken	83
6.2.2	Stoffbedingte Wärmebrücken	84
6.2.3	Geometrische Wärmebrücken	84
6.2.4	Typische Thermogramme schadenfreier Wärmebrücken	86
6.2.5	Rechnerische Untersuchungsmöglichkeiten von Wärmebrücken	92
7	Praxisbeispiele	98
7.1	Wärmebrücken	98
7.1.1	Außenwandecke mit auskragender Betondecke	98
7.1.2	Ungedämmter Fenstersturz	100
7.1.3	Stahlträger ohne thermische Trennung durch Fassade geführt	101
7.1.4	Durch die Wärmedämmebene geführte massive Rundstütze	103
7.1.5	Einbauteil Rollladenkasten	104
7.1.6	Schimmelpilzbildung an einer Außenwandecke – ausführliche Beurteilung ...	106
7.2	Thermografie zur Lokalisierung von Luftundichtigkeiten	114
7.2.1	Unterstützung der Thermografie mit Differenzdruckverfahren (Blower-Door)	114
7.2.2	Luftundichtigkeiten an Fenstern und Türen	119

7.3	Thermografie zur Lokalisierung von Durchfeuchtungen	120
7.3.1	Durchfeuchtungsschäden an einer Kelleraußenwand	121
7.4	Thermografie zur Lokalisierung von Konstruktionseinzelheiten	124
7.4.1	Dokumentation des Verlaufes von Heizungsleitungen im Fußboden	124
7.4.2	Außenwände mit unter Putz verlegten Heizungsleitungen	127
7.4.3	Traganker bei Dreischichtelementen	128
7.4.4	Fachwerkstrukturen	129
7.4.5	Temperaturverteilung bei Stahlträgern eines großflächig verglasten Luftgeschosses	130
7.4.6	Traganker einer hinterlüfteten Außenwandkonstruktion	131
7.4.7	Verstopfungen in Rohrleitungen	133
7.5	Thermografie zur baubegleitenden Qualitätssicherung	133
7.5.1	Untersuchungen vor und nach einer energetischen Gebäudesanierung	133
7.5.2	Überprüfung eines Gebäudes mit Wärmedämmverbundsystem	136
7.5.3	Schallbrücken bei Reihenhaustrennfugen	138
7.5.4	Fehlende Wärmedämmung und Luftundichtigkeiten an Trockenbauwänden	140
7.5.5	Fehlende Wärmedämmung an einer Fensterlaibung	142
7.6	Nutzung der Thermografietechnik in der Forschung	144
7.6.1	Untersuchungen zur Anwendbarkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) als Kenngröße für Wärmetransportvorgänge	144
7.6.2	Betonprobekörper unter zyklischer Beanspruchung	146
7.6.3	Zugversuch an einem Stahldübel	148
8	Thermografische Signaturen typischer Konstruktionen	151
8.1	Wandkonstruktionen, Gebäudehülle	151
8.1.1	Altbau, teilweise mit innenseitiger Wärmedämmung	151
8.1.2	Altbauten mit punktueller Beheizung	152
8.1.3	Hinterlüftete Außenwandkonstruktionen	153
8.1.4	Innenwandkonstruktionen mit Bekleidungen	156
8.1.5	Großflächige Verglasungen	157

8.2	Sonstige Konstruktionen/Materialien	158
8.2.1	Thermografie von Kunststoffen – kritische Betrachtung	158
8.2.2	Thermografieanwendungen außerhalb des Bauwesens	159
9	Zusammenfassung und Kurzleitfaden der Thermogrammerstellung	161
9.1	Allgemeine Voraussetzungen	161
9.2	Durchführung der thermografischen Untersuchung	161
10	Anhang	164
10.1	Nomenklatur	164
10.2	Literaturverzeichnis	167
10.3	Stichwortverzeichnis	170

1 Einleitung

1.1 Einführung und Problemstellung

Gebäude in Deutschland müssen aufgrund jahreszeitlich wechselnder Außenlufttemperaturen zeitweise beheizt werden. Die Beheizung erfolgt im Regelfall während der Heizperiode zwischen Oktober und März. Dies ist erforderlich, um Nutzern bzw. Bewohnern eines Gebäudes ein hygienisches Raumklima mit ausreichend hoher Innenlufttemperatur bereitstellen zu können und um die Gebäudesubstanz zu schützen. Im Rahmen der Ressourcenschonung und Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen steigen auch die gesetzlichen Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz. Die allgemeinen Schutzziele des Wärmeschutzes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Ziele gesetzlicher Anforderungen an den Wärmeschutz:

- gesundes und behagliches Raumklima
- Schutz der Konstruktion vor Feuchteschäden
- Heizkostensparnis
- Verringerung des Energieverbrauches für Beheizung und dadurch Entlastung der Umwelt.

Die Baupraxis zeigt jedoch, dass die oben definierten Anforderungen an Gebäude häufig nicht eingehalten werden und wurden. Baumängel, Fehler und Schäden sind teilweise die Folge. So wurden in dem bislang letzten, 1995 von der Bundesregierung vorgelegten dritten Bauschadensbericht [5] die vermeidbaren Schadenskosten bei Hochbauleistungen auf etwa 3,4 Milliarden Euro beziffert. Ein Großteil dieser Schadenssumme ist hierbei den unzureichenden Planungs- und Ausführungsleistungen der Wärmedämm-Maßnahmen zuzurechnen.

Mit Hilfe innovativer, zerstörungsfreier und schnell einsetzbarer Mess- und Untersuchungsmethoden, wie es die Bauthermografie darstellt, wurden die Voraussetzungen geschaffen, derartige Mängel zu lokalisieren und anschließend Maßnahmen zur Beseitigung einzuleiten. Die Thermografie ist hierbei als Hilfsmittel zu verstehen; die letztendliche Beurteilung der vorgefundenen Situation ist nur mit Sachverstand und Erfahrung möglich.

Das vorliegende Buch soll in komprimierter Form vorhandene Erfahrungen zum Einsatz der passiven Thermografie im Bauwesen den Lesern näher bringen und somit einen Beitrag dazu leisten, die Möglichkeiten aber auch die realistischen Anwendungsgrenzen der Thermografiertechnik aufzuzeigen.

2 Physikalische Grundlagen der Thermografie

2.1 Grundprinzip

Die Thermografie beruht auf der Tatsache, dass jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt ($-273,15\text{ °C}$) eine Eigenstrahlung aussendet. Ursächlich für dieses Phänomen ist die in jedem Körper vorhandene innere mechanische Molekülbewegung. Die Intensität der Molekülbewegung hängt hierbei von der Temperatur des Körpers ab. Da gleichbedeutend mit Molekülbewegungen auch Ladungsbewegungen auftreten, sendet der Körper Energie in Form elektromagnetischer Strahlung aus. Diese Strahlung bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit und gehorcht den optischen Gesetzen. So lässt sich diese Strahlung umlenken, mit Linsensystemen bündeln oder an spiegelnden Flächen reflektieren. Für das menschliche Auge ist die Wärmestrahlung nicht sichtbar und wird dem infraroten¹ Wellenlängenbereich zugeordnet (Abbildung 2-1). Die infrarote Strahlung erstreckt sich in einem Wellenlängenbereich von $\lambda = 0,78\text{ }\mu\text{m}$ bis etwa $1000\text{ }\mu\text{m}$, wobei aus noch zu erläuternden Gründen für die Bauthermografie der Wellenlängenbereich von $\lambda = 3\text{ }\mu\text{m}$ bis $5\text{ }\mu\text{m}$ und hauptsächlich $\lambda = 8\text{ }\mu\text{m}$ bis $14\text{ }\mu\text{m}$ interessant ist.

Die Wärmebildtechnik stellt sich die Aufgabe, die Intensität der abgestrahlten Eigenstrahlung zu messen und daraus die Temperatur der aussendenden (thermografierten) Oberfläche bzw. des Körpers berührungsfrei zu ermitteln.

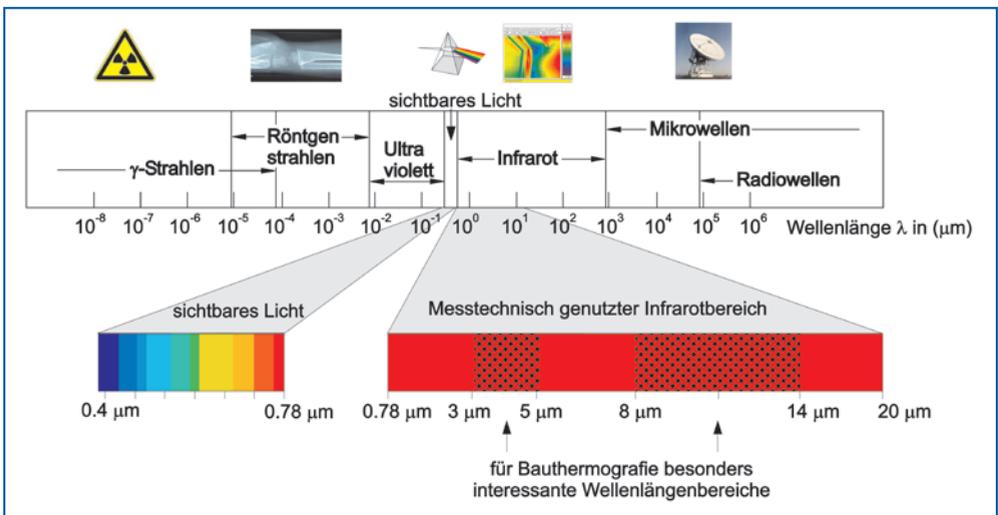


Abbildung 2-1 Elektromagnetisches Spektrum

¹ infra: lateinisch für »unterhalb, unter«, infrarot zeigt an, dass das infrarote Licht sich optisch unter dem roten Licht befindet. Die Bezeichnung bezieht sich nicht auf die Wellenlänge, diese ist gegenüber dem sichtbaren Licht höher.

Da die Thermografie eng mit radiometrischen Zusammenhängen verknüpft ist, werden im Folgenden wichtige Strahlungsgesetzmäßigkeiten erläutert.

2.1.1 Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers

Um die physikalischen Strahlungsgesetzmäßigkeiten eines realen Körpers zu verstehen, hat es sich bewährt, zunächst die Gesetze an einem idealen Strahlungskörper darzustellen. Ein derartiger Körper wird in der Physik als Schwarzer Strahler bezeichnet und ist dadurch gekennzeichnet, dass er von allen Körpern mit gleicher Temperatur die größtmögliche Intensität der abgegebenen Strahlung besitzt.

Als praktische Realisierung eines idealen schwarzen Körpers (= Schwarzer Strahler) kann man sich einen rußgeschwärzten, kugelförmigen Hohlraum mit einer kleinen zylindrischen Öffnung vorstellen. Der mit infrarotstrahlungsundurchlässigen Wandungen ausgeführte Körper befindet sich im thermischen Gleichgewicht, das heißt die Temperatur der Wandungen sei konstant und ändert sich nicht mit der Zeit. Der Strahlungsaustausch mit der Umwelt erfolgt somit nur über die kleine Wandöffnung. Da sich die Temperatur des schwarzen Körpers per Definition nicht ändern soll, muss die von außen einfallende und von der rußgeschwärzten Innenfläche aufgenommene (absorbierte) Strahlung gleich der abgegebenen (emittierten) Strahlung sein.

Nach den von Stefan und Boltzmann 1879 bzw. 1884 formulierten Gesetzen hängt die über die Wandöffnung vom schwarzen Körper ausgehende spezifische Ausstrahlung M nur von der Innentemperatur des schwarzen Körpers ab und berechnet sich zu:

$$M \text{ [W/m}^2\text{]} = \sigma \cdot T^4 = C_s \cdot (T/100)^4 \quad [1]$$

mit: σ Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$
 C_s Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers = $5,67 \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$
 T absolute Temperatur T [K] = $273,15 + \theta$ [°C]

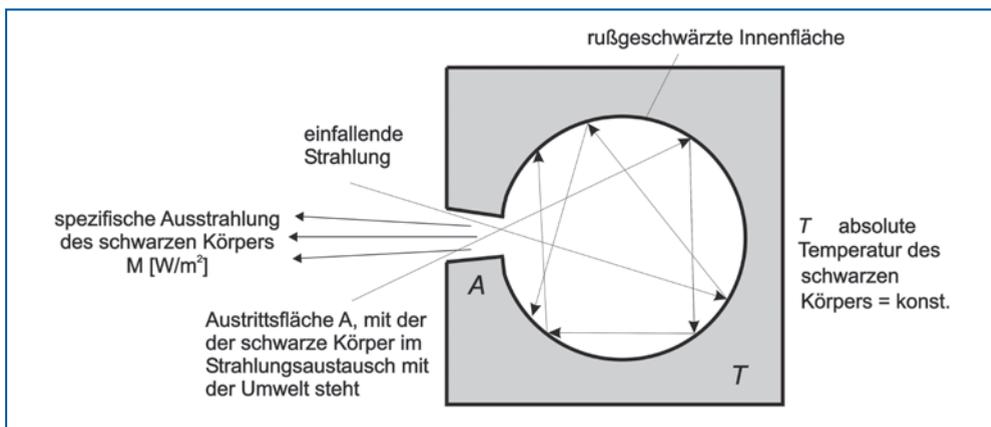


Abbildung 2-2 Modellvorstellung eines schwarzen Körpers

Die in Gleichung [1] beschriebene spezifische Ausstrahlung M gibt die über das gesamte Wellenlängenspektrum aufsummierte Energiemenge wieder. Interessant ist daher die Verteilung der Schwarzkörperstrahlung über die Wellenlänge. Dieser Zusammenhang zwischen der Objekttemperatur des schwarzen Körpers und der spezifischen Ausstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ wird durch das von Max Planck im Jahr 1900 abgeleitete »Plancksche Strahlungsgesetz« beschrieben und ist hier als spektrale spezifische Ausstrahlung dargestellt:

$$M_{\lambda} [\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})] = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1} \quad [2]$$

- mit: c_1 1. Strahlungskonstante = $3,7418 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$
 c_2 2. Strahlungskonstante = $1,4388 \cdot 10^4 \text{ K} \cdot \mu\text{m}$
 T absolute Temperatur T [K] = $273,15 + \theta$ [°C]
 λ Wellenlänge [μm]

Das Plancksche Strahlungsgesetz ist in Abbildung 2-3 für verschiedene absolute Strahlungstemperaturen dargestellt, zudem ist im Diagramm der für Menschen sichtbare Wellenbereich gekennzeichnet. Man erkennt, dass nur heiße Körper in einem Wellenlängenbereich strahlen, der für Menschen sichtbar ist.

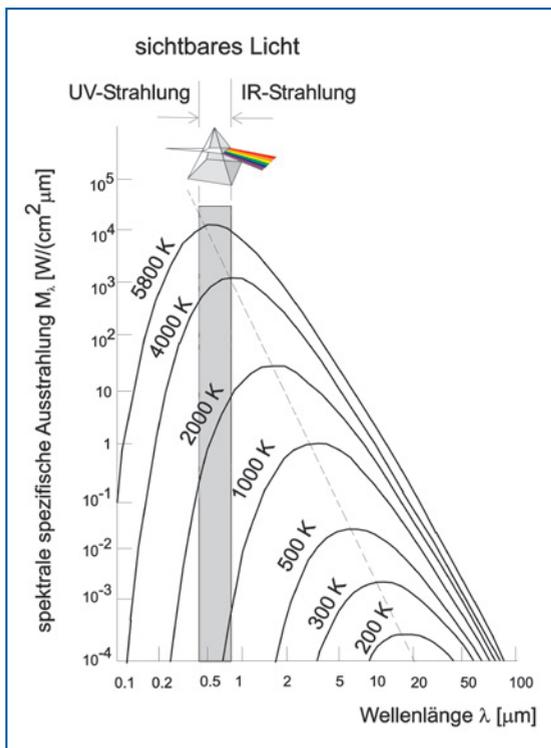


Abbildung 2-3 Plancksches Strahlungsgesetz – Charakteristik eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit der Temperatur und Wellenlänge, der hinterlegte Bereich kennzeichnet den für Menschen sichtbaren Bereich.

Nach dem Planckschen Strahlungsgesetz berechnen sich Kurven gleicher Form, die sich jedoch nicht schneiden. Die Flächen unter den Kurven geben die gesamte Energiemenge an, die ein schwarzer Strahler bei einer bestimmten Temperatur abgibt. Wird die Gleichung [2] über die Wellenlänge integriert, so erhält man das bereits in Gleichung [1] angegebene Stefan-Boltzmann-Gesetz.

$$M = \sigma \cdot T^4 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda} d\lambda \quad [3]$$

Weiterhin ist in der Abbildung 2-3 zu erkennen, dass sich das spezifische Strahlungsmaximum (gestrichelte Linie) mit steigender Absoluttemperatur zu immer kürzeren Wellenlängen verschiebt. Die Lage der spezifischen Ausstrahlungsmaxima – die Wellenlänge bei der ein Körper die größte Ausstrahlung aufweist – kann mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz berechnet werden:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \text{ K} \cdot \mu\text{m}}{T} \quad [4]$$

mit: λ_{\max} Wellenlänge, bei der das Ausstrahlungsmaximum erreicht ist [μm]

T absolute Temperatur T [K] = 273,15 + θ [°C]

In der Tabelle 2-1 sind für einige typische Strahlungstemperaturen die Ausstrahlungsmaxima mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz berechnet.

Tabelle 2-1 Spezifische Strahlungsmaxima in Abhängigkeit von der absoluten Strahlungstemperatur

Körper	absolute Temperatur [K]	Wellenlänge λ_{\max} mit größter spezifischer Ausstrahlung [μm]
Oberflächentemperatur Sonne	5800	0,50
Eisen, hell glühend	1200	2,42
Wasser am Siedepunkt, 100 °C	373	7,77
Körpertemperatur, 37 °C	310	9,35
Außenwand (Innenseite), 17 °C	290	9,99
Gefriertemperatur von Wasser, 0 °C	273	10,62
Außenwand, -5 °C	268	10,81

Die Verteilung der in Abbildung 2-3 gezeigten spezifischen Ausstrahlung kann berechnet werden und ist in Abhängigkeit vom Strahldichtemaximum (Gleichung [4]) in Tabelle 2-2 aufgezeigt:

Tabelle 2-2 Anteile an der Gesamtstrahlung in Abhängigkeit des Ausstrahlungsmaximums λ_{\max} , zur Berechnung vgl. [29]

Wellenlängenbereich [μm]	gerundeter Anteil an der Gesamtstrahlung [%]
0 bis $0,5 \cdot \lambda_{\max}$	1
0 bis $0,7 \cdot \lambda_{\max}$	5
0 bis $0,8 \cdot \lambda_{\max}$	10
0 bis $0,9 \cdot \lambda_{\max}$	20
0 bis $1,0 \cdot \lambda_{\max}$	25
0 bis $1,1 \cdot \lambda_{\max}$	30
0 bis $1,2 \cdot \lambda_{\max}$	40
0 bis $1,4 \cdot \lambda_{\max}$	50
0 bis $1,7 \cdot \lambda_{\max}$	60
0 bis $1,9 \cdot \lambda_{\max}$	70
0 bis $2,4 \cdot \lambda_{\max}$	80
0 bis $3,3 \cdot \lambda_{\max}$	90
0 bis $4,3 \cdot \lambda_{\max}$	95

Erläuterung zur Tabelle 2-2

Das Strahldichtemaximum einer etwa 17 °C (290 K) warmen Wandoberfläche beträgt $\lambda_{\max} \approx 10\ \mu\text{m}$ (vgl. Tabelle 2-1). Das für die Erstellung der Thermogramme in Kapitel 7 und 8 hauptsächlich verwendete IR-Kamera System besitzt einen Empfängerdetektor, der nur im Bereich von $8\ \mu\text{m}$ bis $14\ \mu\text{m}$ IR-Strahlung verarbeiten kann. Im Spektralbereich von 0 bis $0,8 \cdot \lambda_{\max}$ (also von 0 bis $8\ \mu\text{m}$) werden etwa 10% und im Spektralbereich von 0 bis $1,4 \cdot \lambda_{\max}$ (also von 0 bis $14\ \mu\text{m}$) etwa 50% der Gesamtstrahlung ausgesendet. Dem Detektor der oben genannten IR-Kamera steht daher ein Angebot von etwa $50\% - 10\% = 40\%$ der ausgesendeten Gesamtstrahlung zur Verfügung.

Zum Verständnis der obigen Aussagen noch drei Erläuterungen:

- Wenn Stahl erwärmt wird, kann ab etwa 650 °C (923 K) ein dunkelrotes Glühen des Stahls wahrgenommen werden. Ab derartigen Temperaturen erreicht ein Teil der Strahlungscharakteristik den für Menschen sichtbaren Bereich. Das Strahlungsmaximum liegt aber nicht im sichtbaren Bereich vor, sondern nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz bei etwa $3,1\ \mu\text{m}$. Dieser Bereich liegt im infraroten Bereich.
- Aufgrund der sehr hohen Oberflächentemperatur der Sonne ($T \approx 5800\text{ K}$) wird sehr viel Strahlung ausgesandt. Das Ausstrahlungsmaximum liegt in dem für Menschen sichtbaren Bereich. Die Sonnenstrahlung wird daher vom Menschen besonders gut wahrgenommen.
- In der Bauthermografie ist im Allgemeinen von einem üblichen Temperaturbereich von -20 °C bis $+20\text{ °C}$ auszugehen. Das Ausstrahlungsmaximum liegt in einem Bereich von etwa $9,8\ \mu\text{m}$ bis $11,4\ \mu\text{m}$. Dieser Bereich liegt im infraroten Bereich. Zur