



FORSCHUNGS- UND TESTZENTRUM FÜR
SOLARANLAGEN
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Universität Stuttgart



Sonderuntersuchung

Effizienzmessung an einem Infrarotstrahler

Prüfbericht-Nr.: 16SU079

Stuttgart, den 25.07.2016

Auftraggeber: Rudolf KOLLER Ges.m.b.H.
Rudolf-Koller-Straße 1
3902 Vitis
AUSTRIA

Hersteller: Rudolf KOLLER Ges.m.b.H.

Typ: CL-750

Herstelljahr: 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Bestimmung der Emissionsgrade von Vorder- und Rückseite des Infrarotstrahlers.....	3
3	Elektrische Leistungsaufnahme des Infrarotstrahlers	4
4	Bestimmung der Aufheizdauer	4
5	Bestimmung der Oberflächentemperatur des Infrarotstrahlers mittels Infrarot-Thermographie .	6
6	Berechnung der Strahlungsanteile des Infrarotstrahlers	11
7	Berechnung der Strahlungsleistung, des Strahlungswirkungsgrades und der konvektiv abgegebenen Wärme	12
8	Prüfverfahren	13

1 Einleitung

Gegenstand der Untersuchung ist ein Elektro-Strahlungsheizkörper vom Typ CL-750 der Firma Rudolf KOLLER Ges.m.b.H..

Die Ziele der Untersuchung waren:

1. Die Bestimmung des Emissionsgrades von Vorder- und Rückseite des Infrarotstrahlers
2. Die Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme des Infrarotstrahlers
3. Die Bestimmung der Aufheizdauer
4. Die Bestimmung der Oberflächentemperatur des Infrarotstrahlers mittels Infrarot-Thermographie
5. Die Berechnung der Strahlungsleistung und der konvektiv abgegebenen Wärme
6. Die Berechnung des Strahlungs-Wirkungsgrads und des Anteils der IR-C Strahlung

2 Bestimmung der Emissionsgrade von Vorder- und Rückseite des Infrarotstrahlers

Die Bestimmung des Emissionsgrades der Heizkörperoberflächen wurden an beschichteten Stahlblechproben mit dem Messsystem OPTOSOL durchgeführt. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Materialproben. Auf der rechten Seite der Abbildungen sind jeweils die einseitig beschichteten Proben zu sehen, welche für die Messungen verwendet wurden. Bei den untersuchten Proben handelt es sich um Stahlblech mit Pulverbeschichtung. Für die Vorder- und die Rückseite werden dieselben Bleche mit der selben Beschichtung verwendet.

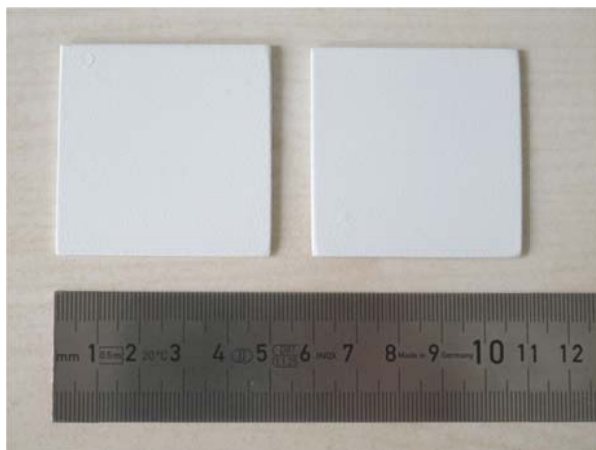


Abbildung 1: Stahlblechproben von vorne

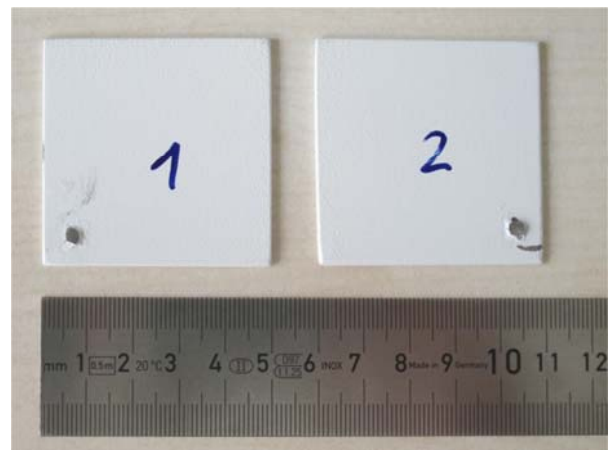


Abbildung 2: Stahlblechproben von hinten

Es wurden an beiden Probe je 20 Einzelmessungen durchgeführt und daraus ein Mittelwert gebildet.

Der Emissionsgrad ϵ des Stahl-Blechtes mit Pulverbeschichtung beträgt ca. 0,96.

Diese Werte wurden für die Temperaturberechnungen in die Thermographie-Kamera eingegeben. Damit ergaben sich, für die mit der Thermographie-Kamera bestimmten Temperaturen, gute Übereinstimmungen gegenüber den direkt mit Thermoelementen auf den Oberflächen gemessenen Temperaturen (siehe auch Kapitel 4).

3 Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme des Infrarotstrahlers

Die elektrische Leistungsaufnahme des Strahlungsheizkörpers wurde sowohl während aller Thermographie-Aufnahmen als auch kontinuierlich während der Bestimmung der Aufheizdauer mit einem Wirkleistungsmesser gemessen. Die Leistungsaufnahme ist abhängig von der Netzspannung. Die Leistungswerte aller Messungen betragen zwischen 558 W bei 215 V~ und 592 W bei 223 V~. Während der Bestimmung der Aufheizdauer betrug die Leistungsaufnahme 580 W bis 587 W und während der Aufnahme der im Prüfbericht dargestellten Thermogramme 576 W bis 590 W, im Mittel bei 580 W.

4 Bestimmung der Aufheizdauer

Zur Bestimmung der Aufheizdauer wurden 4 NiCr-Ni Thermoelemente auf dem Strahlungsheizkörper installiert, je eines im rechten oberen Viertel auf der Vorderseite und unten rechts nahe der Ecke sowie auf der Rückseite im Zentrum und eines oben rechts nahe der Ecke. Diese Messstellen sind repräsentativ für die maximalen und minimalen Temperaturen auf der Vorderseite und Abdeckhaube der Rückseite.

Abbildung 3 zeigt den Strahlungsheizkörper von vorne, montiert am Prüfgestell mittels dem vom Auftraggeber beigefügtem Montagmaterial. Die Thermoelemente wurden mit temperaturbeständigem Aluminium-Klebeband auf der Heizfläche fixiert und die Messstellen punktuell mit Cyanacrylat-Klebstoff aufgeklebt. Zur besseren Ortung der Messstellen auf den Thermogrammen wurden jeweils 2 Aluminium-Aufkleber neben und oberhalb der Messstellen angebracht. Mit Hilfe dieser Temperaturmessstellen wurde auch eine Überprüfung der mittels Thermografie-Kamera bestimmten Temperaturen durchgeführt.



Abbildung 3: Vorderseite des Strahlungsheizkörpers mit zwei Temperaturfühlern

Die Temperaturverläufe an den Messstellen nach dem Einschalten des Strahlungsheizkörpers sind in Abbildung 4 dargestellt. Der Heizkörper wurde um 13:26 Uhr eingeschaltet. Die Erwärmung im Zentrum auf der Vorderseite erfolgt praktisch verzögerungsfrei. Nach 35 Minuten erreicht die Temperatur an dieser Stelle den Endwert. Die Temperaturen am Rand des Strahlungsheizkörpers steigen hingegen langsamer und erreichen erst nach ca. 50 Minuten ihren Endwert. Im Zentrum auf der Rückseite beträgt die Aufheizzeit auf Grund der Wärmedämmung im Inneren und der Temperaturleitfähigkeit des Stahlbleches ca. 75 Min.

Die Aufheizdauer beträgt ca. 45 Minuten, da der Strahlungsheizkörper nach dieser Zeit nach vorne quasi seine volle Strahlungsleistung abgibt.

Die Welligkeit der Temperaturverläufe nach ca. 45 Minuten ist auf die leichte Schwankung der Netzspannung zurückzuführen. Für die Bestimmung der Zeitkonstanten wurden die Mittelwerte der Temperaturen zwischen 14:20 und 15:00 verwendet.

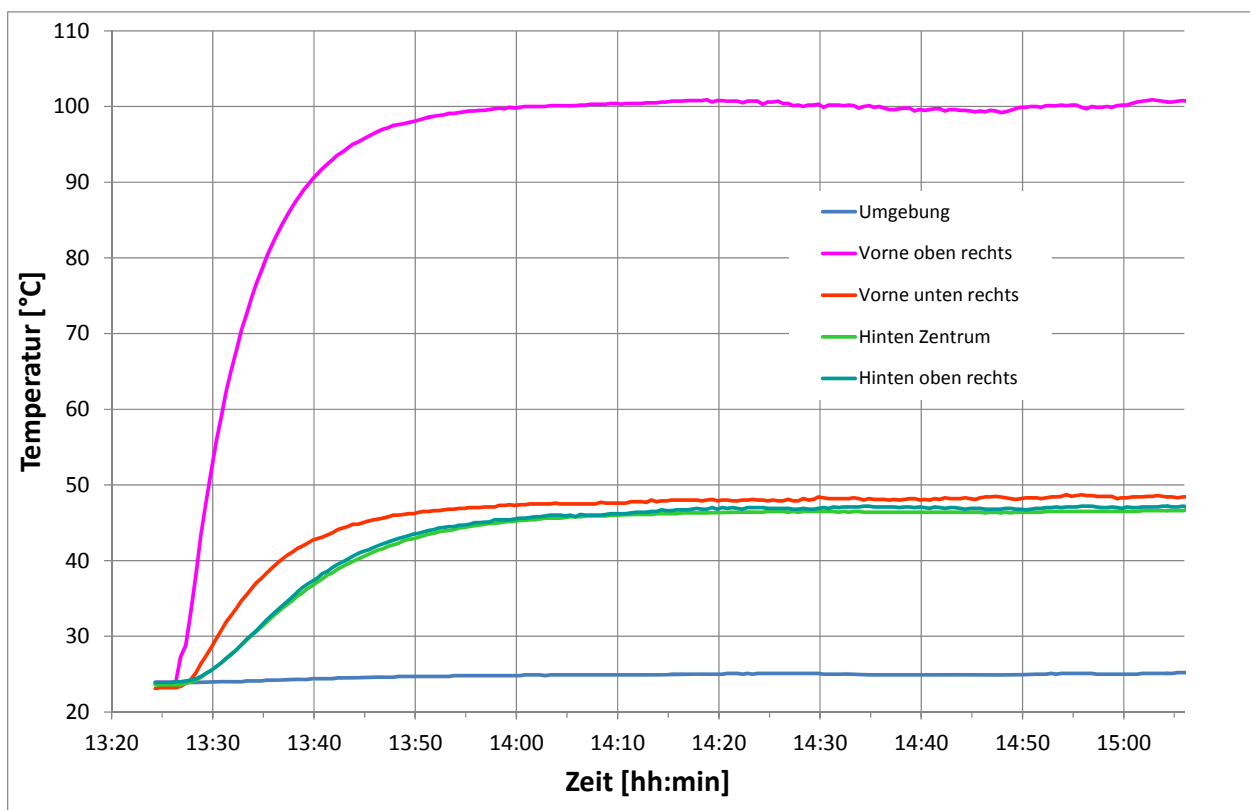


Abbildung 4: Temperaturverläufe der 4 Temperaturmessstellen sowie der Lufttemperatur

5 Bestimmung der Oberflächentemperatur des Infrarotstrahlers mittels Infrarot-Thermographie

Es wurden eine Reihe von Thermografien von der Vorder- und Rückseite, mit und ohne Thermoelemente aufgenommen. Alle Aufnahmen zeigen dieselbe Temperaturverteilung mit geringfügigen Unterschieden der Oberflächentemperaturen, abhängig von der aktuellen Netzspannung.

Der Strahlungsheizkörper hat während des Betriebs auf der Vorderseite auf ca. $\frac{3}{4}$ der Höhe links und rechts in der Mitte die höchste und auf der Rückseite in der Mitte der unteren Hälfte die niedrigste Temperatur.

Vorderseite

Für die Berechnung der Oberflächentemperaturen wurden in die Auswertesoftware die zu Beginn gemessenen Emissionsgrade eingegeben.

Für die Vorderseite des Strahlungsheizkörpers wurde $\varepsilon = 0,96$ verwendet.

Abbildung 5 zeigt das Wärmebild der Vorderseite des Heizkörpers 1 Std. 45 Min. nach dem Einschalten. Der Darstellungsbereich reicht von 38 °C bis 102 °C.

Der schwarze Randbereich entspricht dem Hintergrund des Strahlungsheizkörpers, d. h. der Rückwand des Raumes. Da die Wandtemperatur hinter dem Strahlungsheizkörper mit etwa 27 °C deutlich unter dem Darstellungsbereich liegt, wird sie in der Thermographie nicht mehr farbig angezeigt. Umlaufend um den Strahlungsheizkörper zeigt sich ein sehr schmaler, blauer Rand, dieser entspricht dem umlaufenden Falz des frontseitigen Stahl-Blechtes.

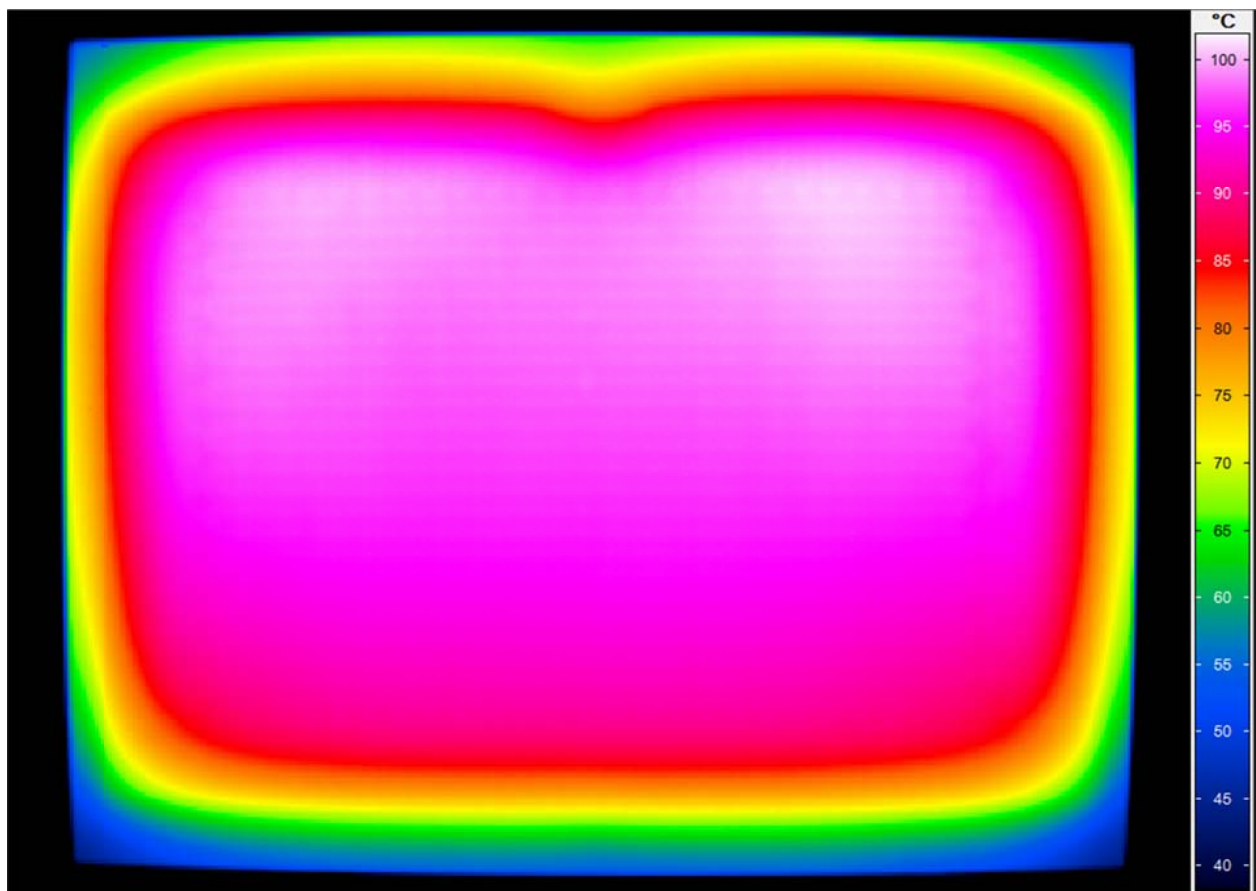


Abbildung 5: Thermographie des Strahlungsheizkörpers von vorne, Darstellungsbereich von 38 °C bis 102 °C

Die Position der rückseitig angebrachten Stahlblechhaube ist von vorne nicht erkennbar. Dies zeigt, dass das frontseitige Stahlblech eine gute Temperaturverteilung bewirkt.

Der rot-orange dargestellte Bereich mit Temperaturen von etwa 85 °C weist in der Mitte am oberen Rand eine leichte Wellung auf. An dieser Stelle ist an der Rückwand der Netzanschluss installiert.

Insgesamt ist die obere Hälfte des Strahlungsheizkörpers im Mittel etwa 7 K wärmer als die untere Hälfte auf Grund der vorliegenden freien Konvektion.

In Abbildung 6 wurde das Thermogramm der Vorderseite in 10 Teilflächen unterteilt. Der Darstellungsbereich reicht hier von 29 °C bis 100 °C. Aufgrund der leichten kissenförmigen Verzerrung des Objektivs, kann ein geringer Teil des Randes nicht in die Berechnung der minimalen Oberflächentemperatur und des Mittelwertes miteinbezogen werden. Diese Fehler sind allerdings in Bezug auf nachfolgende Betrachtungen der Strahlungsleistung vernachlässigbar.

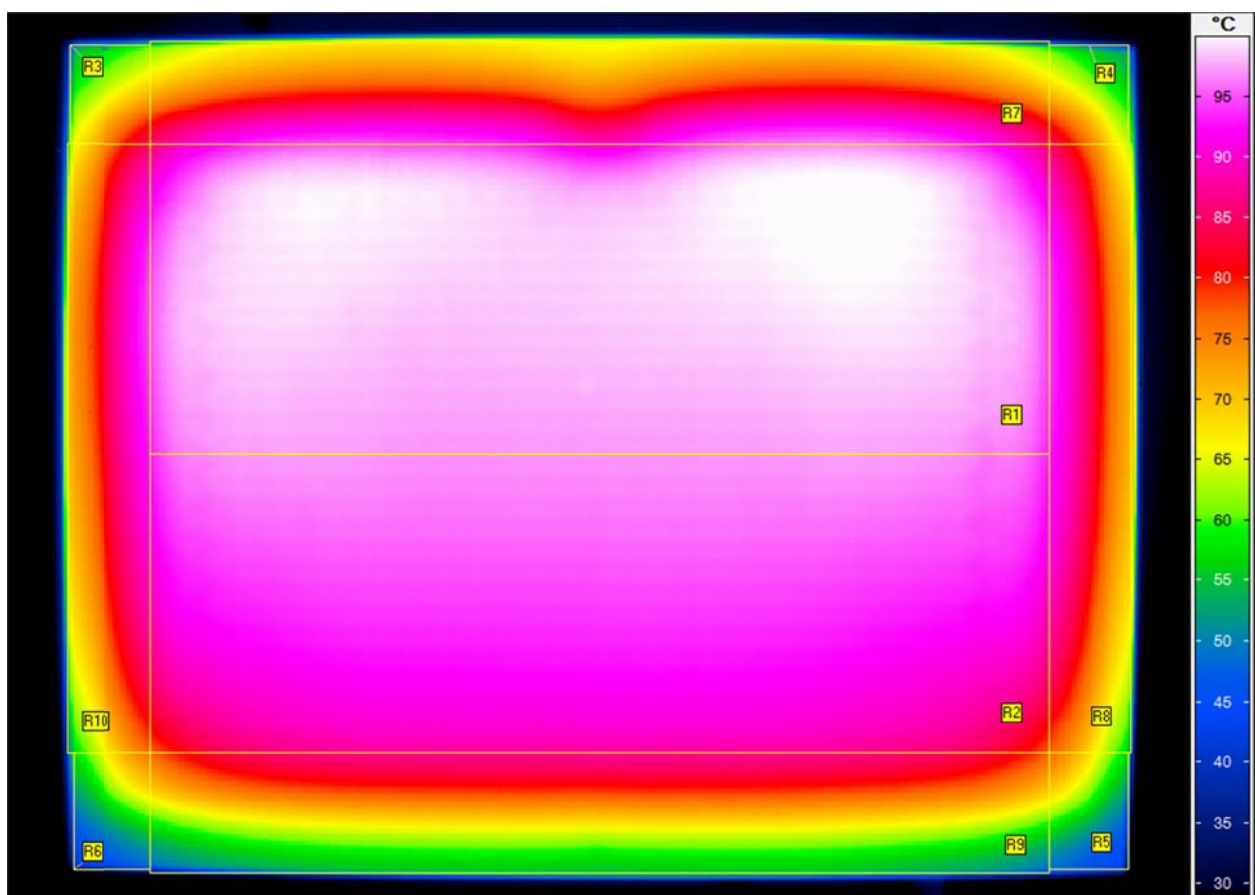


Abbildung 6: Thermographie des Strahlungsheizkörpers von vorn mit Teilflächen
Darstellungsbereich von 29 °C bis 100 °C

In Tabelle 1 sind die minimalen und maximalen Temperaturen sowie die Mittelwerte der jeweiligen Flächen aufgeführt. Erwartungsgemäß sind die unteren beiden Ecken (siehe R5 und R6) am kältesten. Die obere innenliegende Fläche (R1) entspricht 31,4 % der Gesamtfläche und weist eine Mitteltemperatur von 98,1 °C auf. Die höchste Temperatur betrug 101 °C.

Die Mitteltemperatur der Vorderseite des Strahlungsheizkörpers betrug 87,5 °C,

bei einer elektrischen Leistungsaufnahme von 580 W, einer Lufttemperatur von 24,0 °C und einer mittleren Temperatur der umschließenden Fläche (Wände ohne Rückwand, Decke, Boden) von 23,0 °C.

Fläche	Flächenanteil in %	Mittelwert in °C	Minimum in °C	Maximum in °C
R1	31.35	98.08	85.0	100.91
R2	30.44	93.13	76.78	97.41
R3	0.86	65.68	41.72	85.24
R4	0.97	64.49	39.32	85.0
R5	1.13	55.75	29.48	77.09
R6	1.00	55.49	29.78	76.78
R7	10.35	79.45	44.18	96.74
R8	5.92	79.54	39.44	94.44
R9	12.54	69.56	31.12	87.56
R10	5.50	79.83	44.95	95.03

Tabelle 1: Flächenanteile sowie mittlere, minimale und maximale Temperaturen der markierten Flächen

Rückseite

Für die Rückseite des Strahlungsheizkörpers wurde ebenfalls $\epsilon = 0,96$ verwendet.

Das Thermogramm der Rückseite des Strahlungsheizkörpers ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Darstellungsbereich reicht von 34 °C bis 71 °C. Das entsprechende Foto ist darunter in Abbildung 8 zu sehen. Der Strahlungsheizkörper wurde mit dem mitgelieferten Montagmaterial an ein Gestell mit zwei vertikalen L-Profilen montiert. Dadurch wurden Teile der Rückseite verdeckt. Montagmaterial und L-Profile haben annähernd Lufttemperatur und zudem einen niedrigen Emissionsgrad. Aus diesem Grund werden diese in der Thermografie-Aufnahme schwarz dargestellt. In den vier Ecken und an der Unterkante in der Mitte des Heizkörpers sind insgesamt 5 kleine dunkelblaue Punkte zu sehen. An den Stellen der kleinen Punkte befinden sich die Verbindungsschrauben zwischen dem vorderen Stahlblech und der Rückwand. Da der Emissionsgrad von blankem Metall sehr gering ist und die Temperaturen der gesamten Fläche für einen Emissionsgrad von 0.96 berechnet wurden, sind die Temperaturen der Schraubenköpfe in den Abbildungen 7 und 9 deutlich zu niedrig dargestellt. Des Weiteren sind vier größere dunkelblaue Punkte in den Ecken zu sehen, hier befinden sich die Abstandshalter aus Kunststoff. An der Oberkante in der Mitte befinden sich noch das Produktlabel sowie die Abdeckung des elektrischen Anschlusses und das Anschlusskabel.

Umlaufend am Rand, der nicht von der Abdeckhaube aus Stahlblech abgedeckt wird, ergeben sich die höchsten Temperaturen von bis zu 69 °C. Die Wärmeleitung des Stahlblechs, begünstigt durch den direkten Kontakt der Abdeckhaube mit der Frontplatte, führt zu einer Erwärmung des Randbereichs der Abdeckhaube.

Im Zentrum der Rückseite beträgt die Oberflächentemperatur 46 °C.

Zur Bestimmung der Mitteltemperatur der Rückseite wurde die Fläche in Teilflächen (R1 bis R10) aufgeteilt, wie in Abbildung 9 dargestellt. Die Mitteltemperaturen dieser Teilflächen wurden mit der Auswertesoftware der Thermografie-Kamera berechnet. Die durch das Montagegestell und das Anschlusskabel verdeckte Fläche wurde in 7 weitere Teilflächen (R11 bis R17) aufgeteilt. Die Mittelwerte hierzu wurden teilweise aus Mitteltemperaturen der angrenzenden Teilflächen oder aus mehreren Einzeltemperaturen an den jeweiligen Rändern der Teilflächen ermittelt. Aus allen Mittelwerten wurde dann entsprechend den Flächengrößenverhältnissen ein gewichteter Mittelwert für die Oberflächentemperatur der Rückseite berechnet. Messwerte und berechnete Werte (kursiv) sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Bei denselben Bedingungen wie für die Thermographie-Aufnahme der Vorderseite beträgt die **mittlere Oberflächentemperatur der Rückseite 46,1 °C**.

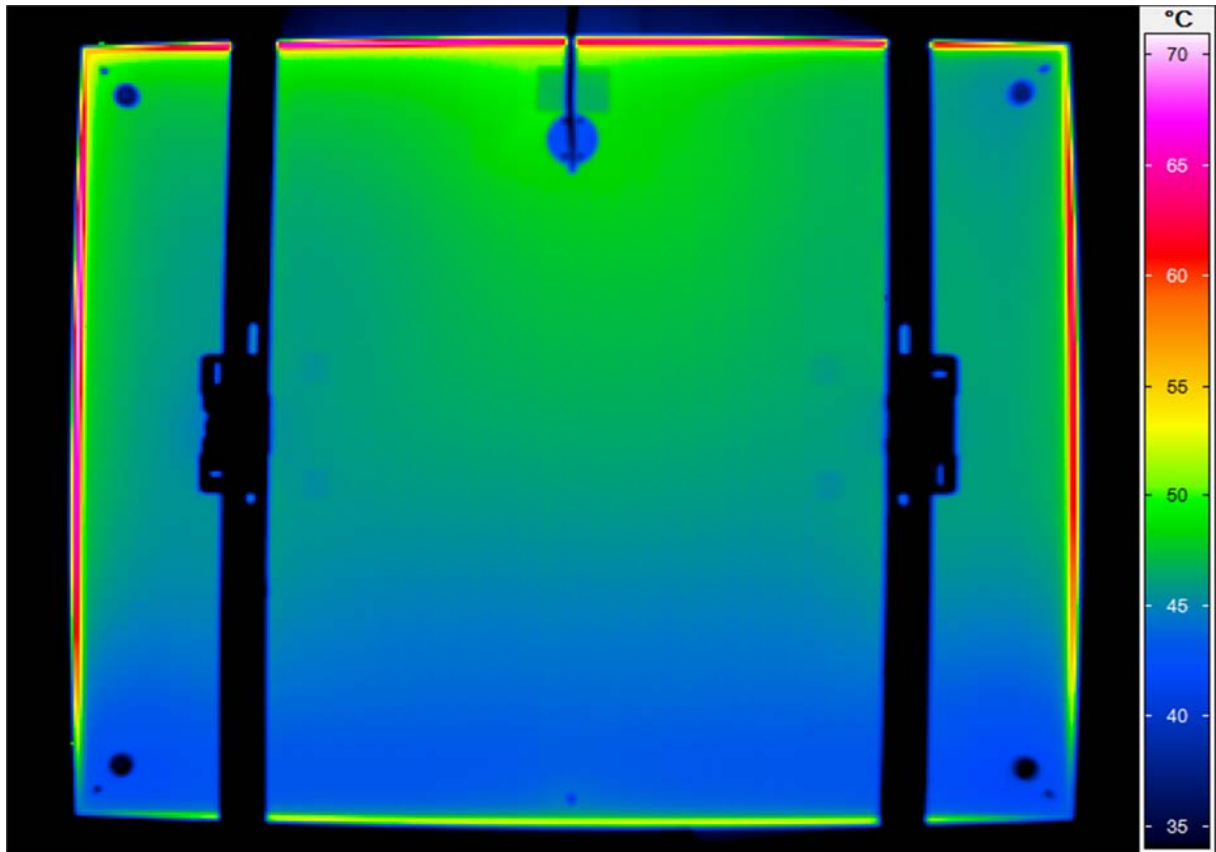


Abbildung 7: Thermographie des Strahlungsheizkörpers von hinten, Darstellungsbereich von 34 °C bis 71 °C



Abbildung 8: Foto des Strahlungsheizkörpers von hinten mit Befestigungselementen und elektrischem Anschluss

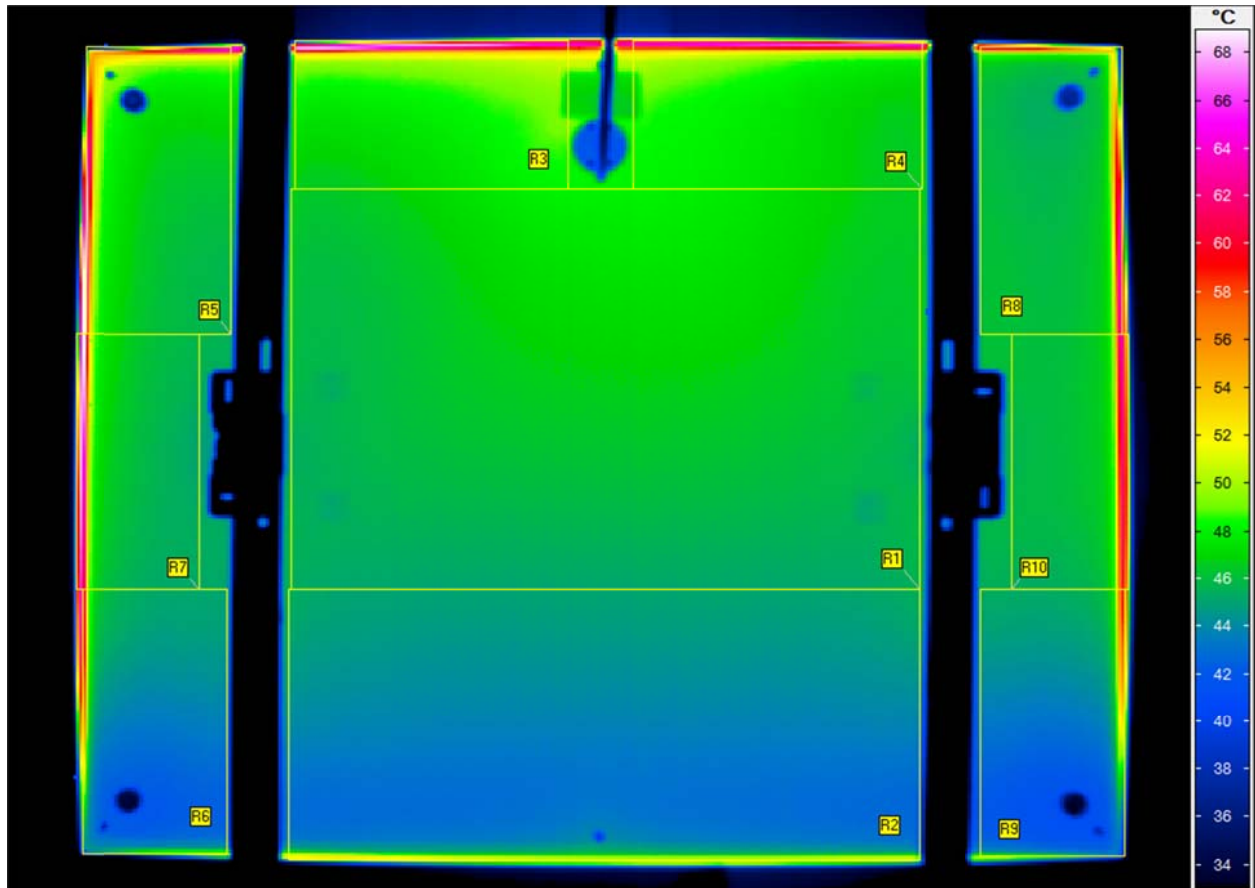


Abbildung 9: Thermographie des Strahlungsheizkörpers von hinten mit Teilflächen
 Darstellungsbereich von 33 °C bis 69 °C

Fläche	Flächenanteil in %	Mittelwert in °C	Minimum in °C	Maximum in °C
R1	29.37	46.26	44.93	48.13
R2	19.98	44.06	39.72	52.33
R3	4.77	49.27	41.98	67.74
R4	5.00	48.74	46.44	66.31
R5	4.89	47.91	34.79	67.50
R6	4.68	44.01	33.44	61.04
R7	4.04	47.56	44.85	69.28
R8	4.79	46.86	33.22	63.52
R9	4.58	43.83	33.18	59.92
R10	3.49	47.38	43.28	63.27
R11	1.12	49.0	-	-
R12	2.10	48.5	-	-
R13	2.05	44.0	-	-
R14	2.48	46.3	-	-
R15	1.98	47.7	-	-
R16	1.93	43.9	-	-
R17	2.76	46.2	-	-
R1 – R17	100	46.09	-	-

Tabelle 2: Flächenanteile sowie mittlere, minimale und maximale Temperaturen der markierten Flächen sowie zusätzlich bestimmte Mitteltemperaturen (R11 bis R 17) der Rückseite

6 Berechnung der Strahlungsanteile des Infrarotstrahlers

Die in den unterschiedlichen Wellenlängenbereichen auftretenden Strahlungsanteile des Strahlungsheizkörpers wurden aus der in den jeweiligen Wellenlängenbereichen berechneten Strahlungsleistung bestimmt. Die Strahlungsleistung wurde berechnet aus dem Emissionsgrad und der mittleren Temperatur der Oberfläche der Vorderseite mit Hilfe des Planck'schen Strahlungsgesetzes:

$$M = \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} \frac{\varepsilon c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda$$

Mit:

Strahlungsleistung M in W/m²

Strahlungskonstante C₁ = 3,741775 * 10⁻¹⁶ W*m²

Strahlungskonstante C₂ = 1,43877 * 10⁻² K*m

Emissionsgrad ε: 0,96

Absolute Temperatur der Oberfläche T: 87,47 °C + 273,15 K = 360,62 K

Wellenlänge λ: IR-A 0,78 μm – 1,4 μm, IR-B 1,4 μm – 3,0 μm, IR-C 3,0 μm – 1000 μm

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Berechnung der Strahlungsanteile aufgeführt.

99,9 % der abgestrahlten Leistung wird im Wellenlängenbereich IR-C und damit zwischen 3,0 μm und 1000 μm emittiert.

	M(IR-A)	M(IR-B)	M(IR-C)	Mges
Strahlungsleistung (W/m ²)	~ 0	~ 0.7	~ 920.0	~ 920.7
Strahlungsanteil (%)	~ 0	~ 0.1	~ 99.9	100

Tabelle 3: Absolute Strahlungsleistung und relative Strahlungsanteile des Strahlungsheizkörpers für verschiedene Wellenlängenbereiche

7 Berechnung der Strahlungsleistung, des Strahlungswirkungsgrades und der konvektiv abgegebenen Wärme

Die emittierte Nettostrahlung einer Fläche, welche mit den sie umgebenden Flächen im Strahlungsaustausch steht wird nach folgender Formel berechnet:

$$\dot{Q}_{12} = A_1 * \sigma * (T_1^4 - T_2^4) / [(1/\epsilon_1) + (1/\epsilon_2 - 1) * A_1/A_2]$$

Mit:

A_1 = Emittierende Teilfläche des Strahlungsheizkörpers ($R_{1\text{vorne}} - R_{10\text{vorne}}$ bzw. $R_{1\text{hinten}} - R_{17\text{hinten}}$)

A_2 = Umgebende Fläche, Wände ohne Rückwand, Decke und Boden

ϵ_1 = Emissionsgrad des Strahlungsheizkörpers: 0,96

ϵ_2 = Emissionsgrad der umgebenden Fläche: 0,90 (bestimmt mit Thermografie-Kamera)

T_1 = Absolute Temperatur der Oberfläche des Strahlungsheizkörpers, Teilflächen siehe oben

T_2 = Absolute Temperatur der umgebenden Fläche: 296,15 K

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante: $5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Für die Berechnungen wurden dieselben Randbedingungen und Messwerte wie für die Thermographie-Aufnahmen verwendet. Die Strahlungsleistung wurde für jede Teilfläche separat mit der Mitteltemperatur der Teilfläche (siehe Tabellen 1 und 2) berechnet und jeweils für Vorder- und Rückseite aufsummiert.

Die Strahlungsleistung der Vorderseite beträgt 320 W.

Die Strahlungsleistung der Rückseite beträgt 92 W.

Der Strahlungswirkungsgrad berechnet sich wie folgt:

$$\eta_{\text{Strahlung}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Strahlung}}}{P_{\text{elektrisch}}} * 100 \%$$

Bei einer elektrischen Leistungsaufnahme des Strahlungsheizkörpers von 580 W ergibt sich ein Strahlungswirkungsgrad für die Vorderseite allein von 55 % und insgesamt, d.h. für die Vorder- und die Rückseite zusammen von 71 %.

Bei einem elektrischen Heizkörper dieser Bauart wird die gesamte elektrisch zugeführte Leistung in Wärme umgewandelt. Auf Grund der beiden punktförmigen Montagehalterungen des Heizkörpers an der Gehäuserückseite kann eine Wärmeabgabe durch Wärmeleitung vernachlässigt werden. Damit berechnet sich die Konvektionsleistung wie folgt:

$$\dot{Q}_{\text{Konvektion}} = P_{\text{elektrisch}} - \dot{Q}_{\text{Strahlung}}$$

Bei einer elektrischen Leistungsaufnahme des Strahlungsheizkörpers von 580 W beträgt die **Konvektionsleistung 168 W** bzw. 29 %.

8 Prüfverfahren

Die Bestimmung der Emissionsgrade wurde mit dem Emissiometer 2000 (Temperatur 70 °C) des Messsystem OPTOSOL durchgeführt.

Für die Thermografie-Aufnahmen wurde das Thermografiesystem VarioCAM® high resolution und die Software IRBIS® 3 plus verwendet.

Die Messung der elektrischen Leistung wurde mit dem Messgerät IME Tema fp durchgeführt.

Eingang des Prüflings: 18.05.2016
Eingang der beschichteten Proben: 23.05.2016
Prüfzeitraum: 22.06.2016 – 13.07.2016
Prüfer: Dipl.-Ing. (FH) C. Twerdy

Stuttgart, den 25.07.2016



Dr.-Ing. Harald Drück
Leiter TZS