



Testanwendung und Verifizierung eines vereinfachten Vergleichsprüfverfahrens bezüglich des Strahlungsanteils von IR Heizkörpern

Auftraggeber: BVIR Verband Infrarot-Heizung e.V.
Prof. Dr. Hermann Matschiner
Am Saalehafen 1
06112 Halle

Auftragnehmer: IET GmbH
Institut für angewandte Energietechnologie
Keßlerstraße 27
07745 Jena

Jena, 2012-07-06

Inhalt

1	Vorbemerkung.....	3
2	Physikalisch-technische Grundlagen.....	4
2.1	Energieabgabe von Heizkörpern.....	4
2.2	Vergleichsmöglichkeiten von Infrarotheizkörpern.....	5
2.3	Energiebilanz beim Strahlungsaustausch.....	5
3	Messkonzept.....	7
3.1	Messgenauigkeit des Strahlungsanteils.....	7
3.1.1	Physikalischer Strahlungsaustausch.....	7
3.1.2	Messung des Strahlungsaustausch mittels Thermokamera.....	10
3.1.3	Theoretische Bestimmungsgenauigkeit für die Ermittlung des Strahlungsaustauschs mittels Thermokamera.....	13
3.2	Objektive Messbedingungen.....	14
3.2.1	Vertikale Anordnung.....	14
3.2.2	Horizontale Anordnung.....	15
3.2.3	Dynamischer thermischer Gleichgewichtszustand.....	15
3.2.4	Minimierung äußerer Einflüsse auf die Messung.....	16
4	Testmessungen.....	17
4.1	Beschreibung Testobjekte (IR-Heizkörper).....	17
4.2	Energiezufuhr.....	17
4.3	Messung der Wandtemperaturen.....	18
4.4	Messung des Aufheizverhaltens.....	20
4.5	Strahlungsmessung.....	21
4.6	Auswertung der Messungen.....	27
4.7	Abschätzung der Messungenauigkeit.....	28
5	Zusammenfassung der Ergebnisse und Verifizierung.....	30
6	Bewertung des vereinfachten Vergleichsprüfverfahrens und Fazit.....	32

Copyright:

Alle Rechte der Vervielfältigung bleiben der IET GmbH vorbehalten. Dem BVIR-Verband Infrarot-Heizung e.V. wird das Recht zur Vervielfältigung und Weitergabe an Dritte nur für den vollständigen Text gewährt. Eine auszugsweise Weitergabe des Textes sowie Veröffentlichung jedweder Art bedarf in jedem Fall der schriftlichen Genehmigung der IET GmbH.

1 Vorbemerkung

Seit langem ist bekannt, dass die Gebäudeheizung mittels Infrarotstrahlung viele Vorteile besitzt; nicht nur der geringere Energieverbrauch, sondern in der Regel auch das angenehmere Raumklima sind Argumente für diese Art zu heizen. In hohen Räumen, Hallen etc. wird Strahlungsheizung auch im gewerblichen Bereich vorteilhaft eingesetzt.

Besonders die einfach zu installierenden, elektrisch beheizten Flächenheizkörper an Wänden oder Decken haben sich für Wohnräume bewährt. Die Erfahrungen zeigen, dass Heizkörper mit einem hohen Strahlungsanteil bei der Wärmeabgabe eine hohe Behaglichkeit ermöglichen und im Regelfall einen sehr niedrigen Energieverbrauch generieren.

Es ist daher das Ziel des BVIR-Verband Infrarot-Heizung e.V., ein einfaches Vergleichsprüfverfahren einsetzen zu können, um die Qualität von Infrarot-Heizkörpern zu vergleichen. Das Verfahren sollte für den Anwendungszweck ausreichend genau und gleichzeitig für den Kunden transparent und verständlich sein, um die Qualitätsbewertung nachvollziehen zu können.

Ausgehend von den physikalisch-technischen Grundlagen wird ein Messkonzept beschrieben. Anschließend wird es im Rahmen einer Testmessung praktisch umgesetzt und bewertet.

Sofern sich der BVIR für den verbandsweiten Einsatz dieses vereinfachten Vergleichsprüfverfahrens bezüglich des Strahlungsanteils von IR Heizkörpern entscheidet, könnten die Abschnitte 2 und 3 die wesentliche Textgrundlage für eine entsprechende Verbandsnorm sein.

2 Physikalisch-technische Grundlagen

2.1 Energieabgabe von Heizkörpern

Die Ursache der Wärmeabgabe eines Heizkörpers an seine Umgebung ist die höhere Temperatur des Heizkörpers gegenüber der ihn umgebenden Luft und gegenüber den mittels Strahlung erreichbaren festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern. Dabei werden folgende Wärmetransportphänomene wirksam:

a) Wärmekonvektion:

Die umschließende warme Fläche des Heizkörpers erwärmt über Wärmeleitung von innen nach außen die unmittelbar anliegende Luft. Diese erwärmte Luft steigt auf und verteilt sich über Konvektion nach und nach im Raum.

b) Wärmestrahlung:

In Abhängigkeit von der Temperatur und von dem Emissionskoeffizienten des Oberflächenmaterials gibt der Heizkörper Wärmestrahlung an seine Umgebung ab. Gleichzeitig empfängt und absorbiert er Wärmestrahlung niedrigerer Temperatur aus der Umgebung. Die Bilanz der Wärmeabgabe über Strahlung ist genau die Differenz aus beiden Strahlungsflüssen. Der als Strahlungswärme fühlbare Anteil entspricht genau dieser Differenz.

c) Indirekte und sonstige Wärmetransportphänomene:

Ein kleiner Teil der Wärme wird auch über den Halter in Form von Wärmeleitung direkt an die Wand abgegeben. Die von der Heizkörperrückseite verursachte Wärmekonvektion bzw. Wärmestrahlung erwärmt die Wand. Eine erwärmte Wand beeinflusst wiederum die Wärmekonvektion sowie die Rückstrahlung auf den Heizkörper. Bei zeitweise durch die Sonne beschienenen Heizkörper werden diese in dieser Zeit von außen erwärmt; sie geben diese zusätzliche Energie anschließend über die oben beschriebenen Wärmepfade wieder ab.

d) Neutrale Wärmetransportphänomene:

An der Oberfläche findet auch eine anteilige Reflexion von Wärmestrahlung statt, die von der Umgebung eingestrahlt wird. Dieser Strahlungsaustausch erhöht den Beitrag der abgestrahlten Energie, stellt aber energetisch keinen Energieaustausch des Heizkörpers mit der Umgebung dar.

Im (quasi-)stationären Zustand, oder auch als dynamischer thermischer Gleichgewichtszustand bezeichnet, wenn sich die Temperatur des Heizkörpers nicht mehr ändert und keine externe Wärmequelle auf den Heizkörper wirkt, ist aufgrund des Energieerhaltungsgesetzes

die Summe der abgegebenen Wärmeleistung über die Pfade a-c gleich der aufgenommenen elektrischen Leistung.

Die tatsächliche Verteilung der Wärmeabgabe auf die Pfade a-c ist sehr von den Umgebungsbedingungen abhängig: Lufttemperaturverteilung, Raumgröße, Raumhöhe, Luftbewegung, Verteilung der Umgebungstemperaturen (Wände, Decken, Möbel etc.), Wandtemperatur u.a.m.

Um Heizkörper bezüglich des Strahlungsanteils quantitativ bewerten zu können, müssen deshalb einheitliche (generalisierte) Wärmeabgabe- und Umgebungsbedingungen geschaffen werden.

2.2 Vergleichsmöglichkeiten von Infrartheizkörpern

Ein signifikanter Einflussfaktor auf die Behaglichkeit und auf den Energieverbrauch ist nach bisherigen Erfahrungen **der Anteil der in den Raum über Wärmestrahlung abgegebenen Energie bezogen auf die eingesetzte Energie.**

Weitere Einflussfaktoren dafür sind

- die Geschwindigkeit der Leistungsanpassung (Aufheiz- bzw. Abkühlzeit)
- das Speichervermögen (relativ ausgeglichene Temperatur)
- der Anteil der Wärmeabgabe nach hinten (Raumabgewandte Seite)
- der Anteil der Wärmeabgabe durch Konvektion

Aufgrund seiner wesentlich höheren Bedeutung gegenüber den anderen genannten Kriterien wurde in Abstimmung mit dem BVIR zunächst nur das Kriterium des Strahlungsanteils ausgewählt, für das ein Vergleichsprüfverfahren getestet werden soll.

Um den unbestimmten Einfluss einer Wand auf der Raumabgewandte Seite für einen Vergleich zu minimieren, sollten die Heizkörper – frei im Raum stehend – vergleichend gemessen werden, wobei als wirksames Kriterium für den Strahlungsanteil nur die Abstrahlung von der Vorderfläche gewählt werden sollte.

2.3 Energiebilanz beim Strahlungsaustausch

Die von einem Heizkörper bei konstanter elektrischer Leistungsaufnahme erreichbare Oberflächentemperatur stellt ein Gleichgewicht zwischen Energieaufnahme und Energieabgabe dar. Da die zugeführte elektrische Energie zu 100% in Wärme umgesetzt wird, gilt dann:

$$P_{el} = P_{Kon} + P_{S,Raum} + P_{S,Kanten} + P_{S,Wand} \quad (1)$$

mit:

P_{el} : zugeführte elektrische Leistung

P_{Kon} : durch Konvektion abgegebene Leistung

$P_{S,Raum}$: durch Infrarotstrahlungsaustausch in den Raum von der Vorderfläche
abgegebene Leistung (Halbraum vorn 180°)

$P_{S,Kanten}$: durch Infrarotstrahlungsaustausch über die Kantenflächen abgegebene
Leistung (teilweise nach vorn, teilweise nach hinten in Richtung Wand)

$P_{S,Wand}$: durch Infrarotstrahlungsaustausch von der Rückfläche abgegebene Leistung
(rückseitiger Halbraum in Richtung Wand)

Die elektrische Leistungsaufnahme lässt sich direkt mittels eines Strommessers bestimmen.

Gemäß den Ausführungen im Abschnitt 2.2. wäre dann als Vergleichskriterium der speziell
hier definierte **Einfache Strahlungswirkungsgrad**

$$\eta_{S,Raum}$$

(„Anteil der von der Vorderfläche mit den Raum ausgetauschten Strahlungsleistung bezogen
auf die aufgenommene Leistung“) für Strahlungsheizkörper, wie folgt, zu bestimmen:

$$\eta_{S,Raum} = P_{S,Raum} / P_{el} \quad (2)$$

Aufgrund des Zusammenhangs in Formel (1) ist der oben definierte **Einfache
Strahlungswirkungsgrad** wesentlich und unmittelbar abhängig von der durch Konvektion
bzw. durch rückseitigen Strahlungsaustausch abgegebenen Leistung. Diese Größe ist damit
als unabhängiges Vergleichskriterium sehr gut geeignet.

3 Messkonzept

3.1 Messgenauigkeit des Strahlungsanteils

Die erreichbare Genauigkeit bei der Bestimmung des oben definierten Einfachen Strahlungswirkungsgrades ist unmittelbar von der Genauigkeit der Bestimmung der ausgetauschten Strahlungsleistung abhängig. Da die Messung der Strahlungsleistung mittels Thermokamera indirekt über die Bestimmung der Oberflächentemperaturverteilung und des daraus berechneten Strahlungsaustausches erfolgt, wird nachfolgend ermittelt, wie genau eine solche Messung ist.

3.1.1 Physikalischer Strahlungsaustausch

Die durch Infrarotstrahlungsaustausch abgegebene Leistung P_S setzt sich zusammen aus

$$P_S = P_{S,em} + P_{S,refl} - P_{S,auftr} \quad (3a)$$

$P_{S,em}$: durch Infrarotstrahlung emittierte Leistung

$P_{S,refl}$: Leistung der von der Umgebung emittierten und vom Heizkörper reflektierten Infrarotstrahlung

$P_{S,auftr}$: Leistung der von der Umgebung emittierten und auf dem Heizkörper auftreffenden Infrarotstrahlung

Durch Definition des absorbierten Anteils

$$P_{S,ab} = P_{S,auftr} - P_{S,refl} \quad (3b)$$

kann man den neutralen Reflexionsanteil eliminieren:

$$P_S = P_{S,em} - P_{S,ab} \quad (3c)$$

$P_{S,ab}$: Leistung der von der Umgebung emittierten und vom Heizkörper absorbierten Infrarotstrahlung

Die Leistung der von einem Körper emittierten Strahlung $P_{S,em}$ beträgt bei einer Idealisierung eines grauen Strahlers und einer konstanten Temperatur der äußeren Oberfläche nach Anwendung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes:

$$P_{S,em} = \epsilon_{HK} \cdot \sigma \cdot A_{HK} \cdot T_{HK}^4 \quad (4)$$

mit:

ϵ_{HK} : Emissionsfaktor des Körpers (ca. 0,9 - 0,95 für die Heizkörper)

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

A_{HK} : Oberfläche des Körpers in m^2

T_{HK} : Oberflächentemperatur des Körpers in Kelvin

Die Leistung der von einem Körper absorbierten Strahlung beträgt bei einer Idealisierung von grauen Strahlern und einer konstanten Oberflächentemperatur der den Heizkörper umgebenden Flächen sowie einer Vernachlässigung der Strahlungsabsorption in der Luft nach Anwendung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes:

$$P_{S,ab,o.Ref.} = \alpha_{HK} \cdot \epsilon_{Umg} \cdot \sigma \cdot A_{HK} \cdot T_{Umg}^4 \quad (5)$$

mit:

$P_{S,ab,o.Ref.}$: Leistung der von der Umgebung direkt emittierten und vom Heizkörper absorbierten Infrarotstrahlung ohne Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen an den Umgebungsflächen und ohne Rückreflexion am Heizkörper

α_{HK} : Absorptionsfaktor des Körpers = Emissionsfaktor des Körpers (ca. 0,9 - 0,95 für die Heizkörper)

ϵ_{Umg} : Emissionsfaktor der Umgebungsflächen (ca. 0,9 - 0,95 für die meisten Baumaterialien einschließlich Holz, Textilien und Papier, jedoch nicht für Metalle)

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

A_{HK} : Oberfläche des Körpers in m^2

T_{Umg} : Oberflächentemperatur der Umgebungsflächen in Kelvin

Weiterer Strahlungsaustausch erfolgt durch einmalige Reflexion der Umgebungsstrahlung an den Umgebungsflächen sowie durch Reflexion an der Oberfläche des Heizkörpers (Reflexionsfaktor = 1- Absorptionsfaktor) sowie durch Reflexion der vom Heizkörper abgestrahlten Leistung an den Umgebungsflächen. Auf diese Weise entsteht eine unendliche Reihe immer kleinerer Strahlungsanteile. Nach einschlägiger Fachliteratur¹ ergibt das unter den oben genannten idealisierten Bedingungen folgende ausgetauschte Strahlungsleistung pro Fläche:

$$P_S / A_{HK} = (P_{S,em} - P_{S,ab}) / A_{HK} \quad (6a)$$

¹ Z.Bsp.: B. Glück, Strahlungsheizung – Theorie und Praxis, VEB Verlag für Bauwesen Berlin 1981

$$= \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{HK}} + \frac{A_{HK}}{A_{Umg}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{Umg}} - 1 \right)} (T_{HK}^4 - T_{Umg}^4) \quad (6b)$$

$P_{S,em}$: durch Infrarotstrahlung emittierte Leistung

$P_{S,ab}$: vom Heizkörper durch Infrarotstrahlung absorbierte Leistung, d.h. auch unter Berücksichtigung aller Mehrfachreflexionen zwischen Heizkörper und Umgebung

A_{Umg} : gesamte Oberfläche der Umgebungsflächen, die mit dem Heizkörper Strahlung austauschen, in m²

Ist der Messraum ausreichend groß ($A_{HK} / A_{Umg} \ll 1$) kann Gleichung (6) näherungsweise, wie folgt dargestellt werden.

$$P_S / A_{HK} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (T_{HK}^4 - T_{Umg}^4) \quad (7)$$

Bei einem angenommenen Verhältnis A_{HK} / A_{Umg} von 5% und einem angenommenen Emissionsfaktor von Heizkörper ε_{HK} und Umgebung ε_{Umg} von jeweils 0,9 liegt der relative Fehler durch die vorgenommene Näherung 0,5%.

Dieser mathematische Sachverhalt spiegelt hier den „Effekt der Hohlraumstrahlung“ wider: In einem ausreichend großen Hohlraum (groß gegenüber der „Störung“ durch Messung) mitteln sich durch Mehrfachreflexionen an den Innenwänden die Strahlungsanteile aus, so dass der Messraum letztlich als Schwarzer Hohlraumstrahler funktioniert und der Emissionsfaktor der Umgebungsflächen keine Rolle mehr spielt.

Für die von der Vorderfläche in den Raum somit resultierend abgegebenen Strahlungsleistung ergibt sich daraus

$$P_{S,Raum} \approx \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot A_{HK,Raum} \cdot (T_{HK}^4 - T_{Umg}^4) \quad (8)$$

$P_{S,Raum}$: durch Infrarotstrahlungsaustausch in den Raum von der Vorderfläche abgegebene Leistung (Halbraum vorn 180°)

$A_{HK,Raum}$: Oberfläche der Raum-zugewandten Fläche des Heizkörpers in m²

Unter Vernachlässigung eines kleinen Fehlers (< 0,5%, vgl. Gleichung (6) und (7)) ist die resultierend in den Raum abgegebene Strahlungsleistung unabhängig von dem Emissionsfaktor der Umgebung.

Die Heizkörper-Vorderfläche kann man sich auch als eine aus vielen Teilflächen $A_{HK,Raum,i}$ ($i = 1 \dots n$) zusammengesetzte Fläche vorstellen, wobei die Temperatur einer solchen Teilfläche mit $T_{HK,i}$ bezeichnet wird.

Damit ergibt sich für einen Heizkörper mit einer bestimmten Temperaturverteilung im dynamischen thermischen Gleichgewichtszustand²:

$$P_{S,Raum} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot \left(\sum (A_{HK,i} \cdot T_{HK,i}^4) - \sum A_{HK,i} \cdot T_{Umg}^4 \right) \quad (9)$$

$$P_{S,Raum} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot \left(\sum (A_{HK,i} \cdot T_{HK,i}^4) - A_{HK,Raum} \cdot T_{Umg}^4 \right) \quad (10)$$

Die Formel (10) gilt entsprechend dem obigen Ausführungen unter folgenden Annahmen näherungsweise:

1. Die Umgebungsflächen haben alle eine annähernd gleiche Temperatur
2. Heizkörper und Umgebungsflächen werden als graue Strahler angenommen.
3. Das Lambertschen Kosinus-Gesetz ist für den Heizkörper vollumfänglich gültig.
4. Die Strahlungsabsorption der Luft wird vernachlässigt.
5. Der Umgebungsraum für den Heizkörper ist in Richtung der zu betrachteten Strahlung ausreichend groß, so dass das Flächenverhältnis zwischen Heizkörperfläche und rückstrahlender Umgebungsfläche klein gegenüber 1 ist, höchstens aber 5%.
6. Die Umgebungsfläche besteht aus üblichen Baumaterialien (z.B. Ziegel, Beton, Gestein, Holz, Papier, Textilien, Dispersionsfarbe etc.); der Metallanteil an der abstrahlenden Umgebungsfläche ist sehr klein gegenüber den o. g. üblichen Baumaterialien, höchstens 1%

Unter Berücksichtigung von Gleichung (4) kann man Gleichung (10) auftrennen:

$$P_{S,Raum} = P_{S,em} - P_{S,ab} \quad (11a)$$

Dabei gilt:

$$P_{S,em} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot \left(\sum (A_{HK,i} \cdot T_{HK,i}^4) \right) \quad (11b)$$

$$P_{S,ab} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot A_{HK,Raum} \cdot T_{Umg}^4 \quad (11c)$$

3.1.2 Messung des Strahlungsaustausch mittels Thermokamera

Eine Thermokamera misst analog wie jede Fotokamera die Infrarot-„Helligkeit“ von Oberflächen. Die Helligkeit entspricht einer bestimmten Abstrahlungsleistung pro Fläche für jedes Flächenelement $A_{HK,i}$, wobei zunächst sowohl der vom Körper emittierte als auch der

² D.h. zugeführte elektrische Energie und abgeführte Wärme über Konvektion und Strahlung gleichen sich aus, so dass sich die Temperatur der Heizkörperoberfläche nicht ändert.

vom Körper reflektierte Anteil gemessen wird. Die gemessene Abstrahlungsintensität stellt sich unter Berücksichtigung obiger Ausführungen formelmäßig, wie folgt, dar:

$$I_{S,Raum,i} = P_{S,mess,i} / A_{HK,i} = (P_{S,em,i} + P_{S,refl,i}) / A_{HK,i} \quad (12a)$$

$$P_{S,em,i} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot A_{HK,i} \cdot T_{HK,i}^4 \quad (12b)$$

$$P_{S,refl,i} = \sigma \cdot (1 - \varepsilon_{HK}) \cdot A_{HK,i} \cdot T_{Umg}^4 \quad (12c)$$

Mit

$I_{S,Raum,i}$ gemessene Abstrahlungsintensität (Intensität der Abstrahlung von der Vorderfläche des Heizkörpers in den Raum)

$P_{S,mess,i} / A_{HK,i}$ gemessene Abstrahlungsleistung pro Fläche

$P_{S,mess,i}$ Abstrahlungsleistung, berechnet aus der gemessenen Abstrahlungsintensität und des jeweiligen Flächenmaßes

Die Kamera-Software rechnet die jeweilige Abstrahlungsleistung pro Fläche von einem Flächenelement, d.h. die Strahlungsintensität $I_{S,Raum}$, unter Annahme idealisierter grauer Strahler und unter Annahme der Gültigkeit des Lambertschen Kosinus-Gesetzes intern unter Vorgabe des Emissionsfaktors und unter Berücksichtigung der Umgebungstemperaturstrahlung in Temperaturwerte um. Bei nahezu senkrechter Abstrahlung ist das Lambertsche Kosinus-Gesetz eine sehr gute Näherung für graue Strahler, so dass diese Idealisierung gerechtfertigt ist.

Gleichzeitig kann die Kamera den Anteil der Umgebungsstrahlung herauskorrigieren, wenn Umgebungstemperatur und Emissionsfaktor des Heizkörpers vorgegeben werden, so dass die Abstrahlungsleistung pro Teilfläche aus Emission für jede Teilfläche als interne Daten zur Verfügung steht.

Als Vergleichskriterium für die Strahlungsheizungen wurde jedoch nicht die Leistung der Strahlungsemission sondern gemäß Abschnitt 2.3 der Leistungsaustausch durch Strahlung festgelegt. Insofern gilt es zu prüfen, ob die in Gleichung (9) bzw. (10) dargestellten Abhängigkeiten durch die Thermokamera-Messung abgebildet werden können.

Um die Bestimmungsunschärfe abzuschätzen, wird angenommen

$$\varepsilon_{HK,vorg} = \varepsilon_{HK} \cdot (1 + \xi) \quad (13)$$

$\varepsilon_{HK,vorg}$: Emissionsfaktor des Heizkörpers als Vorgabe für die Kalibrierung der Thermographie

Außerdem wird die Größe $T_{HK,mess,i}$ wie folgt eingeführt:

$T_{HK,mess,i}$: Mit der Thermokamera intern ermittelte Oberflächentemperatur des Heizkörpers in Kelvin.

In (13) ist ξ eine kleine Größe im Bereich $-0,1 \dots + 0,1$. Dies trifft für alle in der Praxis relevanten Fälle zu, wenn beispielsweise $\varepsilon_{HK,vorg} = 0,9$ angenommen wird, dann kann der tatsächliche Emissionsfaktor ε_{HK} für alle üblichen Baumaterialien und Lacke gemäß Gleichung (13) dargestellt werden; lediglich ausgeschlossen sind blanke Metallflächen.

Wendet man obiges auf Gleichung (12a) an ergibt sich:

$$I_{S,Raum,i} = (\sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot A_{HK,i} \cdot T_{HK,i}^4 + \sigma \cdot (1 - \varepsilon_{HK}) \cdot A_{HK,i} \cdot T_{Umg}^4) / A_{HK,i} \quad (14)$$

$$I_{S,Raum,i} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) + \sigma \cdot T_{Umg}^4 \quad (15)$$

Um die Temperatur des Heizkörpers berechnen zu können, werden die Vorgabewerte $\varepsilon_{HK,vorg}$ und T_{Umg} einsetzt:

$$I_{S,Raum,i} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK,vorg} \cdot (T_{HK,mess,i}^4 - T_{Umg}^4) + \sigma \cdot T_{Umg}^4 \quad (16)$$

$$I_{S,Raum,i} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (1 + \xi) \cdot (T_{HK,mess,i}^4 - T_{Umg}^4) + \sigma \cdot T_{Umg}^4 \quad (17)$$

$$T_{HK,mess,i}^4 = (I_{S,Raum,i} - \sigma \cdot T_{Umg}^4) / (\sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (1 + \xi)) + T_{Umg}^4 \quad (18)$$

Ersetzt man $I_{S,Raum,i}$ durch die Beziehung zu den tatsächlichen Werten entsprechend Gleichung (15) so findet man

$$T_{HK,mess,i}^4 = (\sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) + \sigma \cdot T_{Umg}^4 - \sigma \cdot T_{Umg}^4) / (\sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (1 + \xi)) + T_{Umg}^4 \quad (19)$$

$$T_{HK,mess,i}^4 = (\sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4)) / (\sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (1 + \xi)) + T_{Umg}^4 \quad (20)$$

$$T_{HK,mess,i}^4 = (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) / (1 + \xi) + T_{Umg}^4 \quad (21)$$

$$T_{HK,mess,i}^4 \approx (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) \cdot (1 - \xi) + T_{Umg}^4 \quad (22)$$

$$T_{HK,mess,i}^4 = T_{HK,i}^4 - (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) \cdot \xi \quad (23)$$

$$T_{HK,mess,i}^4 = T_{HK,i}^4 \cdot (1 - \xi \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) / T_{HK,i}^4) \quad (24)$$

D.h. je nach Abweichung der Vorgabe des Emissionsfaktors vom tatsächlichen Wert, wird auch eine von der tatsächlichen Temperatur $T_{HK,i}$ abweichende Temperatur $T_{HK,mess,i}$ bestimmt.

$$T_{HK,mess,i}^4 = T_{HK,i}^4 \cdot (1 - \phi) \quad \text{mit} \quad \phi = \xi \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) / T_{HK,i}^4 \quad (25)$$

Der Strahlungsaustausch wird nun entsprechend Gleichung (9) für jedes Flächenelement mit den „Ersatzwerten“ $T_{HK,mess,i}$ und $\varepsilon_{HK,vorg}$ berechnet (vgl. (28) ff.):

$$P_{S,Raum,i} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (A_{HK,i} \cdot T_{HK,i}^4 - A_{HK,i} \cdot T_{Umg}^4) \quad (26)$$

$$P_{S,Raum,i} / A_{HK,i} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) = I_{S,Raum,i} \quad (27)$$

$$P_{S,Raum,i} / A_{HK,i} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK,vorg} \cdot (T_{HK,mess,i}^4 - T_{Umg}^4) = I_{S,Raum,i} \quad (28)$$

$$P_{S,Raum,i} / A_{HK,i} = \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (1 + \xi) \cdot (T_{HK,i}^4 \cdot (1 - \phi) - T_{Umg}^4) \quad (29)$$

$$= \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (1 + \xi) \cdot (T_{HK,i}^4 \cdot (1 - \xi \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) / T_{HK,i}^4) - T_{Umg}^4) \quad (30)$$

$$= \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (1 + \xi) \cdot (T_{HK,i}^4 - \xi \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) - T_{Umg}^4) \quad (31)$$

$$= \sigma \cdot \varepsilon_{HK} \cdot (T_{HK,i}^4 - T_{Umg}^4) \cdot (1 - \xi^2) \quad (32)$$

Da ξ eine kleine Größe war, ist ξ^2 noch kleiner und kann gegen 1 vernachlässigt werden, so dass man Gleichung (27) erhält. Damit wurde gezeigt, dass die Unschärfe des Emissionsfaktors des Heizkörpers in erster Näherung nicht die Genauigkeit der Bestimmung der Strahlungsleistung beeinflusst.

Da Gleichung (32) somit näherungsweise in Gleichung (27) überführt werden kann, ist es für die Bestimmung der Strahlungsintensität mittels Thermokamera in erster Näherung ausreichend, wenn ein Emissionsfaktor „in der Nähe“ des tatsächlichen Wertes vorgegeben wird, auf dessen Grundlage nachher die Oberflächentemperatur von der Kamera-Software berechnet wird.

Die Umgebungstemperatur sollte über verschiedene Messungen, zum Beispiel Lufttemperatur-, Berührungstemperatur- bzw. Strahlungstemperaturmessung, so genau wie möglich bestimmt werden. Es ist auch darauf zu achten, dass ein (quasi-)statischer Zustand bzw. ein dynamisches thermisches Gleichgewicht des Temperatúraustauschs zwischen Luft und Umgebungsfläche erreicht ist.

Durch die Summation der Strahlungsbeiträge aller Teilflächen (z.B. Bild-Pixel oder Pixelfelder) erhält man dann nach Gleichung (10) die resultierend von der Vorderfläche des Heizkörpers ausgetauschte Strahlungsleistung in den Raum und damit unter Verwendung von Gleichung (2) den einfachen Strahlungswirkungsgrad.

3.1.3 Theoretische Bestimmungsgenauigkeit für die Ermittlung des Strahlungsaustauschs mittels Thermokamera

Unter der theoretischen Annahme, dass Thermokamera, elektrischer Leistungsmesser und das Temperaturmessverfahren für die Umgebungstemperatur punktgenau messen, wird hier

bewertet, welche Bestimmungsunschärfe durch das beschriebene Messverfahren mit den idealisierten Annahmen (vgl. Text nach Gleichung (10)) entsteht.

Die Unschärfe, die dadurch entsteht, dass die idealisierten Annahmen nicht vollumfänglich gelten (z.B. kein idealer grauer Strahler) ist ohne weiteres bezifferbar. Vielmehr muss das Messergebnis so verstanden werden, dass hier zum Zweck eines Vergleiches repräsentative Werte unter gleichen Messbedingungen und unter gleichen Annahmen ermittelt werden, unabhängig davon ob die Annahmen volle Gültigkeit haben.

Laut obiger Ausführungen wurden Näherungen durch Vernachlässigung von Reihengliedern 2. Ordnung beim Übergang von Gleichung (6) nach Gleichung (7) und von Gleichung (21) nach Gleichung (22) sowie von Gleichung (32) nach Gleichung (27) durchgeführt. Diese Näherungsoperation hat den gleichen Rang wie die o. g. idealisierten Annahmen, insbesondere die Gültigkeit des Modells des grauen Strahlers und des Lambertschen Kosinus-Gesetzes.

Für den geplanten Anwendungszweck des Vergleichsprüfverfahrens sollte dieser hier beschriebene kleine Modellfehler akzeptabel sein, da letzten Endes genau der Strahlungsanteil bewertet wird, der am stärksten die positiven Effekte einer Strahlungsheizung beeinflusst: Die Strahlung senkrecht zur Vorderfläche zwischen Heizkörper und Raum.

Für eine vollständige physikalische Bewertung eines strahlenden Heizkörpers, wäre eine vollständige 3-dimensionale Messung über 360° (Höhen und Breitengrade) der tatsächlichen Strahlungsleistung unter extrem genauen stabilen Versuchsbedingungen notwendig. Das ist aber nicht das Ziel des hier beschriebenen Verfahrens.

3.2 Objektive Messbedingungen

Hier gilt es objektive Messbedingungen zu definieren, so dass neben dem systematischen Fehler des Auswerteverfahrens sowie den Unschärfen der eingesetzten Messtechnik möglichst keine weiteren Einflüsse wirksam werden, die das Ergebnis verfälschen könnten.

Da es sich um Vergleichsmessungen handeln soll, wird die Messanordnung so genau wie möglich beschrieben, um einen hohen Grad der Reproduzierbarkeit zu erzielen.

3.2.1 Vertikale Anordnung

Heizkörper werden überwiegend in vertikaler Anordnung installiert. Deshalb sollte eine Messbedingung auch das beinhalten. Aus der Sicht größtmöglicher Objektivität haben wir folgende Bedingungen gewählt:

- Vertikale Anordnung auf einem im Raum freistehenden Gestell, das auf der Rückseite mit dem Heizkörper verbunden wird
- Höhe der Unterkante über dem Boden > 50 cm
- Abstand Vorderfläche zur nächsten Wand > 3 m
- Abstand Rückseite zur nächsten Wand: > 1m
- Heizkörper sollten in Normallage, d.h. in der Regel querliegend, vermessen werden.
- Heizkörper, die stark von der quadratischen Form abweichen, sollten aufrecht stehend und quer liegend gemessen werden

3.2.2 Horizontale Anordnung

Strahlungsheizungen arbeiten besonders effizient (im Sinne eines hohen Strahlungsanteils), wenn sie flach unter der Decke installiert werden. So ist es dringend angeraten, auch eine solche Messbedingung zu definieren:

- Horizontale Anordnung auf einem im Raum freistehenden oder an der Decke befestigten Gestell, das auf der Rückseite mit dem Heizkörper verbunden wird
- Höhe über Vorderfläche über Boden: > 2,60 m
- Abstand Seitenkante zur nächsten Wand: > 0,5 m

Abstand Rückseite zur Decke: < 0,25 m

Sofern technisch möglich sollte eine direkte Montage unter der Decke ohne Zwischenraum angestrebt werden, wenn der Heizkörper rückseitig ausreichend gedämmt ist und wenn diese Montageart für den zu untersuchenden Heizkörper geeignet ist.

3.2.3 Dynamischer thermischer Gleichgewichtszustand

Für eine zuverlässige Messung ist die Gewährleistung eines Zustandes im dynamischen Temperaturngleichgewicht notwendig, bei dem Temperaturveränderungen rund um das betrachtete System zum Stillstand gekommen sind. Dazu muss zunächst die Raumluft mit den Umschließungsflächen des Raumes im Gleichgewicht sein, d.h.

- Die Temperaturverteilung der Luft in der Höhe und in der Fläche ist ausgeglichen. Sie sollte im Bereich der üblichen Wohnnutzung liegen, d.h. 20...23°C
- Die Wand-, Decken- und Bodentemperaturen sind mit der Lufttemperatur ausgeglichen
- Externe Strahlung von der Sonne oder von im Raum installierten Heizkörpern oder von Personen im Raum wird geeignet abgeschattet oder entfernt.

- Externe Konvektionsquellen, z.B. geöffnete Fenster und Türen, Lüfter, Heizkörper, elektrische Geräte, werden weitgehend beseitigt oder unwirksam gemacht

Außerdem sollte der Heizkörper aufgeheizt sein und bei konstanter elektrischer Leistungsaufnahme seine Temperatur nicht mehr ändern.

- Sofern bei Nennleistung der Thermostat nicht unterbricht, sollte die Messung bei Nennleistung erfolgen.
- Andernfalls ist die maximal mögliche elektrische Leistung einzustellen, bei der der Thermostat nicht unterbricht; auch hier ist die Erreichung des dynamischen Temperaturgleichgewichts abzuwarten. Der hierbei verwendete Leistungswert ist mit zu dokumentieren

Zu beachten ist, dass bei längeren Messungen unvermeidlich eine Erwärmung des Raumes, d.h. der Raumluft und der Umschließungsflächen, stattfindet. Ggf. sind die Messreihen zwischenzeitlich zu unterbrechen, damit der Raum wieder abkühlen kann.

Die Prüfung des dynamischen thermischen Gleichgewichtszustandes vor jeder Messung ist zu dokumentieren.

3.2.4 Minimierung äußerer Einflüsse auf die Messung

Praktisch wird die Gewährleistung eines guten dynamischen thermischen Gleichgewichtszustandes nicht immer einfach sein. Jahreszeitliche Veränderungen oder Nutzungsänderung der benachbarten Mieter, einschließlich oben und unten, können die Qualität des Messraumes wesentlich beeinflussen.

Für einfache Messungen gilt es dann den Zustand des dynamischen Temperaturgleichgewichts – so weit wie möglich – herzustellen und die unvermeidbaren Abweichungen zu dokumentieren. Zusätzliche Mess- oder Bestimmungsfehler sind dann in einer gesonderten Fehlerbetrachtung zu ermitteln.

Das gleich gilt, wenn es die Größe oder Höhe des Messraumes oder die Geometrie des Heizkörpers nicht zulassen, die Lagebedingungen vollumfänglich einzuhalten. Auch hier sind die Anordnungsbedingungen – so weit wie möglich – herzustellen und die unvermeidbaren Abweichungen zu dokumentieren. Zusätzliche Mess- oder Bestimmungsfehler sind dann in einer gesonderten Fehlerbetrachtung zu ermitteln.

4 Testmessungen

4.1 Beschreibung Testobjekte (IR-Heizkörper)

Für die Messungen standen 3 Heizkörper zur Verfügung. Diese ähnelten sich vom Aufbau her (gute Dämmung der Rückseite, Metallverkleidung der Rückseite), unterschieden sich jedoch bezüglich ihrer Geometrie bzw. bezüglich der elektrischen Kennwerte.

Tabelle 1: Liste der getesteten IR-Heizkörper

Nr.	Nennleistung [W]	Breite [m]	Höhe [m]	Frontfläche [m ²]	spezifische Leistung [W/m ²]	Dicke [cm]
1	330	1,25	0,322	0,403	832	3
2	600	1,19	0,59	0,702	855	3
3	300	0,61	0,61	0,37	811	3

Heizkörper 1 wurde in drei verschiedenen räumlichen Anordnungen gemessen:

- vertikal frei im Raum stehend, quer liegend (Abstand zum Boden = 0,67m)
- vertikal frei im Raum stehend, aufrecht stehend (Abstand zum Boden = 0,55 m)
- horizontal unter der Raumdecke hängend (Abstand zum Boden = 2,75m, Abstand der Rückseite zur Decke = 0,23m)

Heizkörper 2 wurde nur horizontal unter der Raumdecke hängend (Abstand zum Boden = 2,71m, Abstand zur Decke = 0,27m) gemessen. Für Heizkörper 3 erfolgten lediglich eine qualitative Bestimmung des Aufheizverhaltes, sowie eine IR-Grobuntersuchung.

4.2 Energiezufuhr

Die Versorgung der IR-Heizkörper mit elektrischer Energie erfolgte mittels eines Stelltrafos. Dadurch konnten stufenlos die gewünschten Spannungen und somit auch die Leistungen eingestellt werden. Die Überwachung der elektrischen Leistungsaufnahme erfolgte durch Strommessgeräte mit einer Genauigkeit von $\pm 1W \pm 1\%$ (Herstellerangabe).



Abbildung 1a und 3b: Stelltrafo und Strommessgerät

4.3 Messung der Wandtemperaturen

Durch Prof. Rüttinger wurde am Messtag auf Wunsch des Auftraggebers mittels eines IR-Panoramasensors eine Abtastung der Wandtemperaturen durchgeführt.



Abbildung 2: IR-Panoramasensor

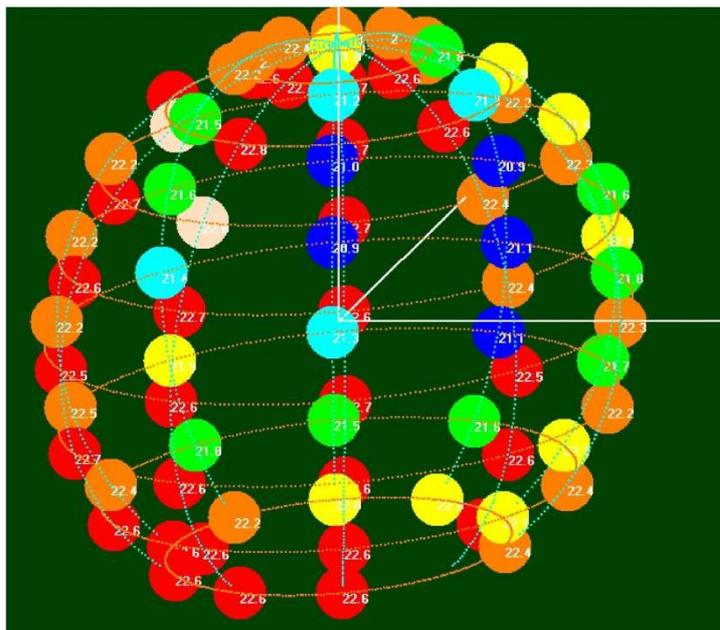


Abbildung 3: Verteilung der Wandtemperaturen auf die jeweiligen Raumwinkel

Als mittlere Wandtemperatur wurde ca. 22°C ermittelt. Der Bestimmungsfehler wird mit 1K angenommen.

Zusätzlich wurde auch zur Verifikation der Messung die Lufttemperatur des Raumes mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Sie lag im Messzeitraum zwischen 22°C und 23°C

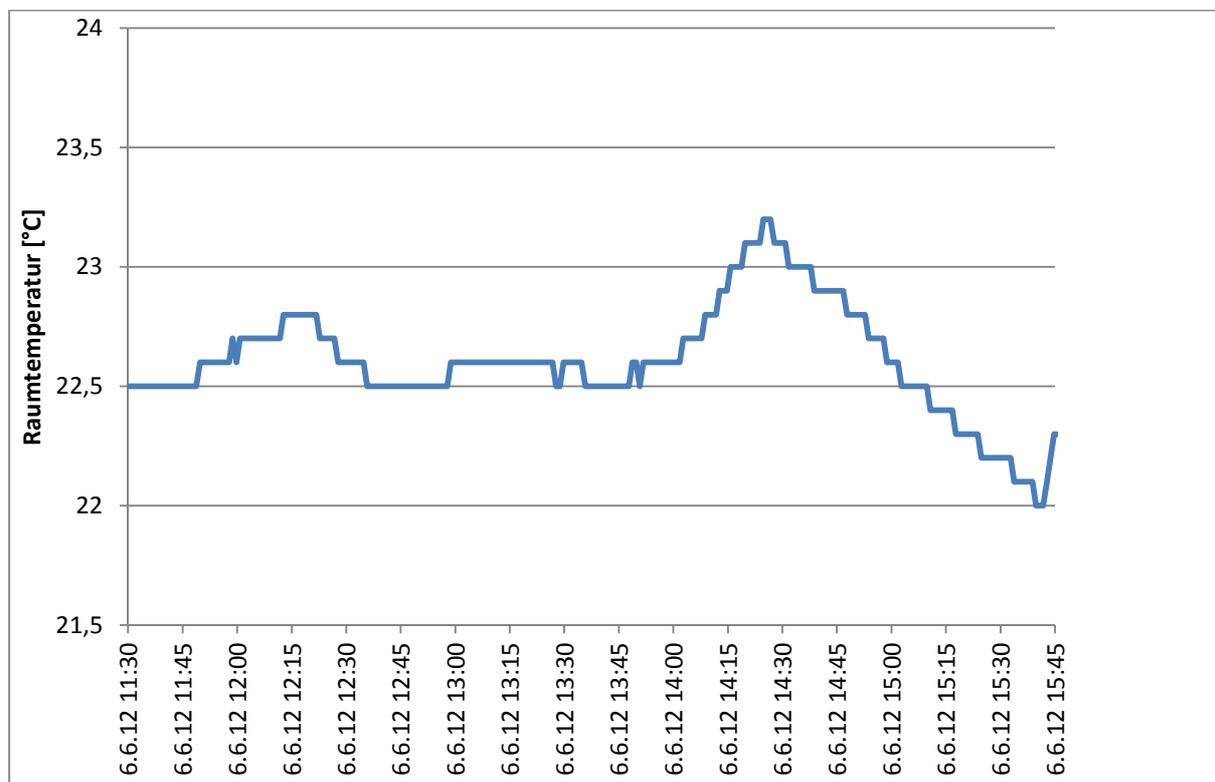


Diagramm 1: Raumtemperatur im Messraum während der Messungen

4.4 Messung des Aufheizverhaltens

Während der Aufheizphasen in den verschiedenen Testanordnungen der Heizkörper wurde mittels eines Kontakttemperatursensors die Oberflächentemperatur der Heizkörper mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Da die Oberfläche und die Messspitze des Sensors keine physikalische Einheit bilden, weicht die gemessene Temperatur deutlich von der tatsächlichen Oberflächentemperatur nach unten ab. Diese Art der Messung eignet sich nicht dafür, Aussagen bezüglich der tatsächlichen Oberflächentemperatur zu treffen. Jedoch kann man durch diese Messung feststellen, bis zu welchem Grad die Maximaltemperatur³ der Platte erreicht ist, und Aussagen zur Aufheizgeschwindigkeit treffen.

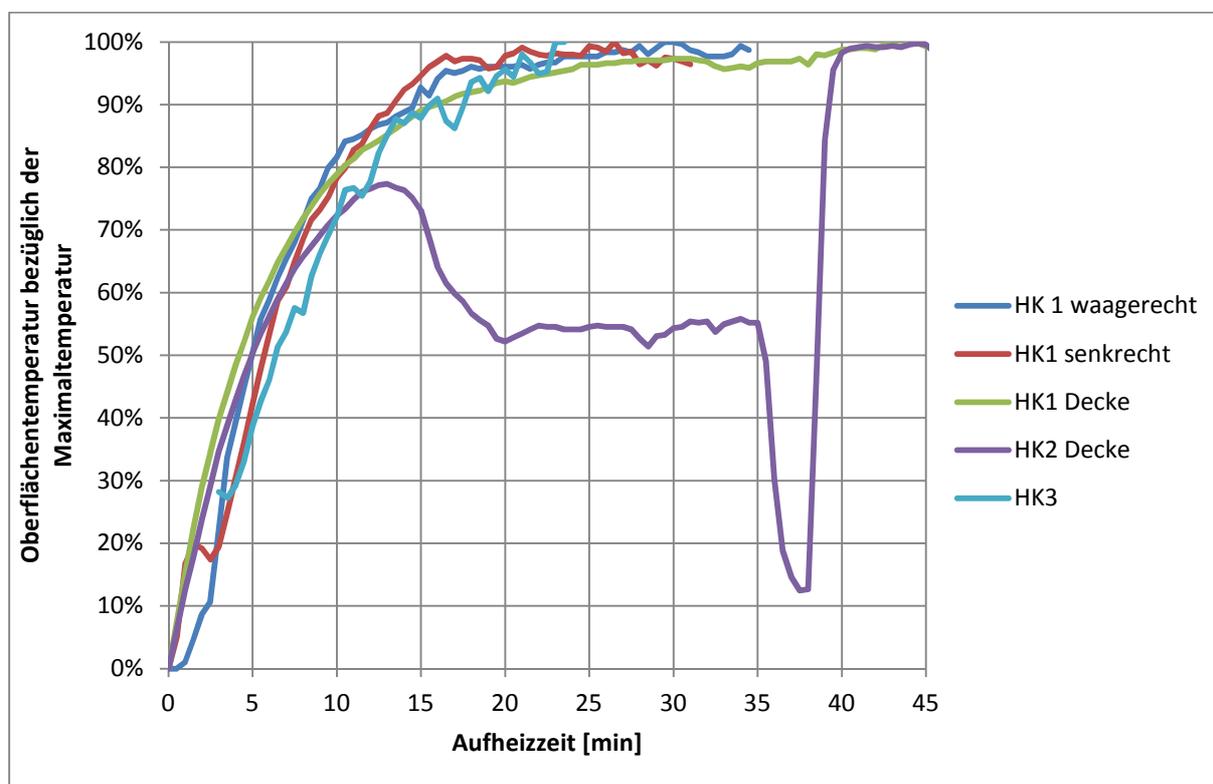


Diagramm 2: zeitliches Aufheizverhalten der Heizkörper⁴

³ Die Prozentangabe der erreichten Temperatur bezieht sich auf den Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und Maximaltemperatur.

⁴ Die Befestigung der Temperatursensoren an der Oberfläche der Heizkörper erfolgte provisorisch mit Klebeband. In einigen Fällen (insbesondere Messung HK 2 an der Decke) löste sich diese Verbindung teilweise, sodass die Qualität der Messergebnisse zum Teil eingeschränkt ist.

Bei allen Heizkörpern und in allen Anordnungen wurden nach 15 Minuten ca. 90% der Maximaltemperatur erreicht. Nach 30 ... 45 Minuten wurde der Zustand des dynamischen Temperaturgleichgewichts erreicht.

4.5 Strahlungsmessung

Um Temperaturmatrizen der Heizkörperoberflächen erstellen zu können, wurden von den Heizkörpern im dynamischen thermischen Gleichgewichtszustand Infrarotbilder mittels einer Thermokamera aufgenommen. Als Messparameter der Kamera wurde ein Emissionsfaktor der gemessenen Oberfläche von 0,9 und für die Raumtemperaturkorrektur (RTC) eine Umgebungstemperatur von 22°C eingestellt.

Da die Heizkörper zum Teil nicht auf ein einzelnes Bild passten, wurden teilweise bis zu 4 Teilbilder erstellt und die entsprechenden Temperaturmatrizen anschließend zusammengefügt.

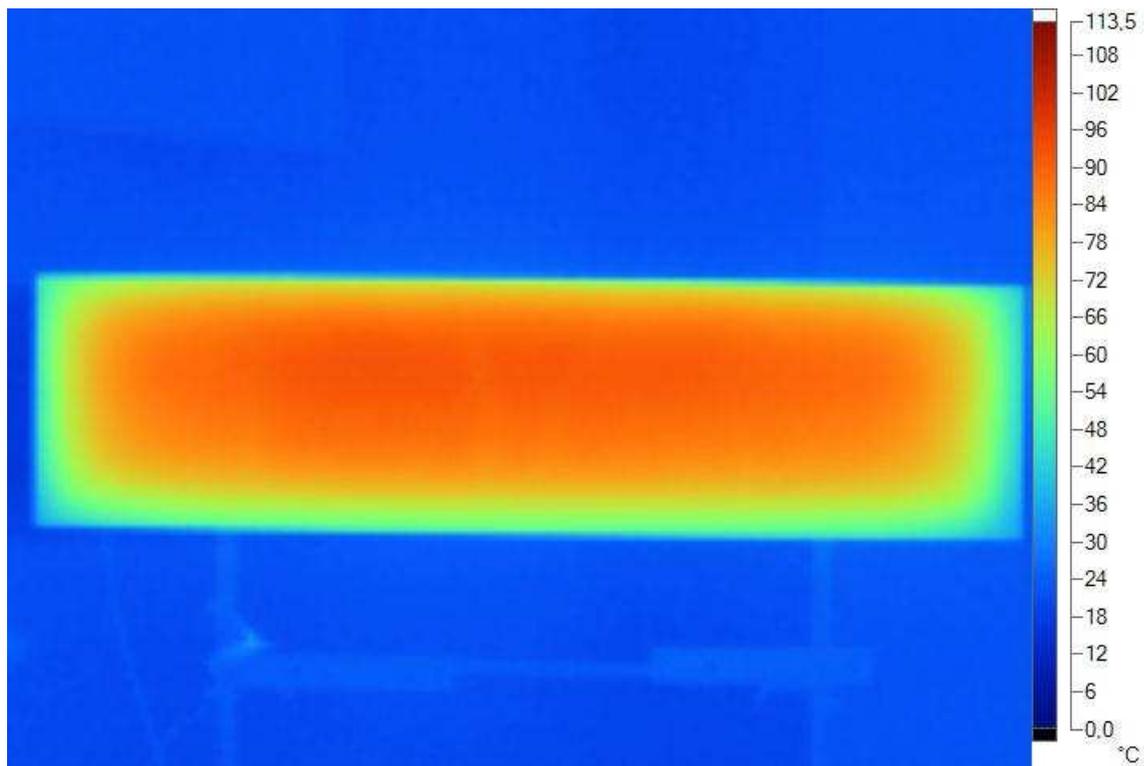
In den Beschreibungen zur Anordnung wurden folgende Begriffe gewählt:

Vertikal: Plattenheizkörper steht senkrecht zu Boden / Decke

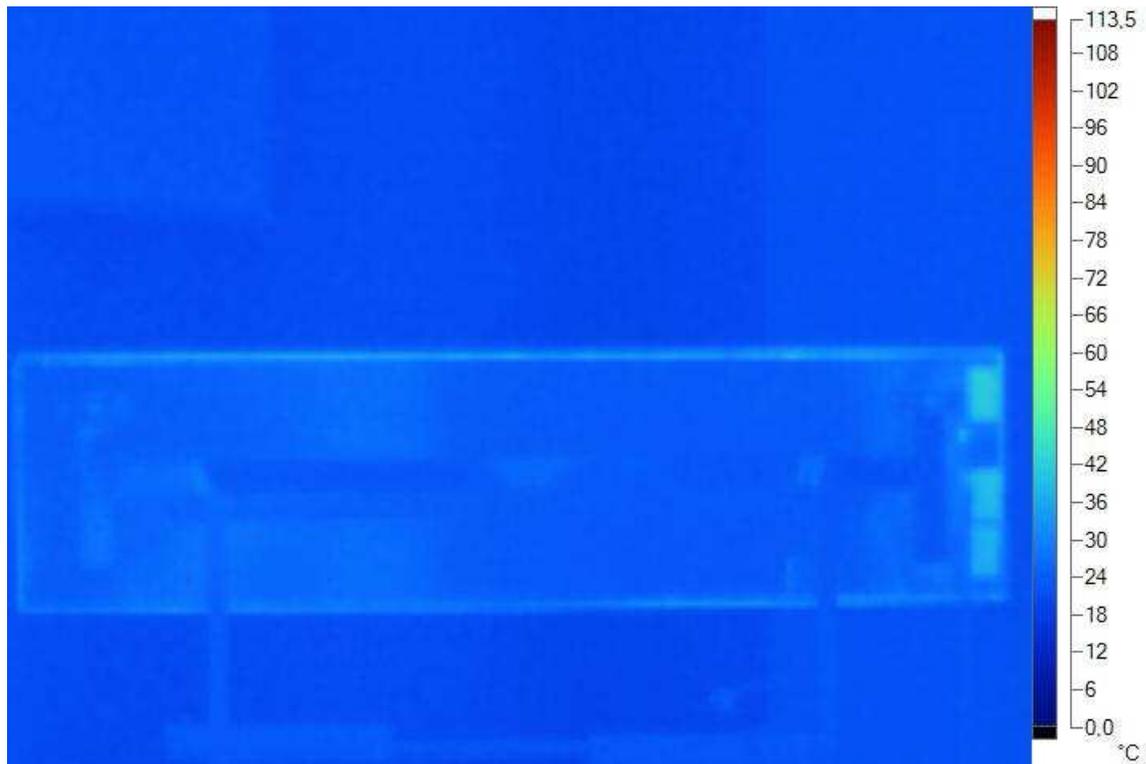
Horizontal: Plattenheizkörper steht parallel zu Boden / Decke

Quer liegend: Längere Kante des Plattenheizkörpers liegt parallel zu Boden / Decke

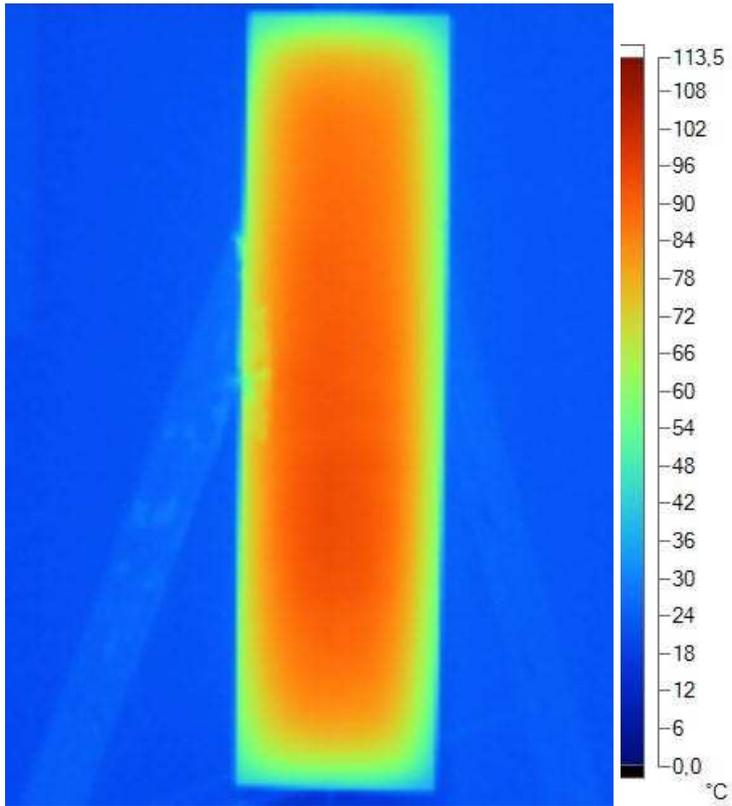
Aufrecht stehend: Längere Kante des Plattenheizkörpers steht senkrecht zu Boden / Decke



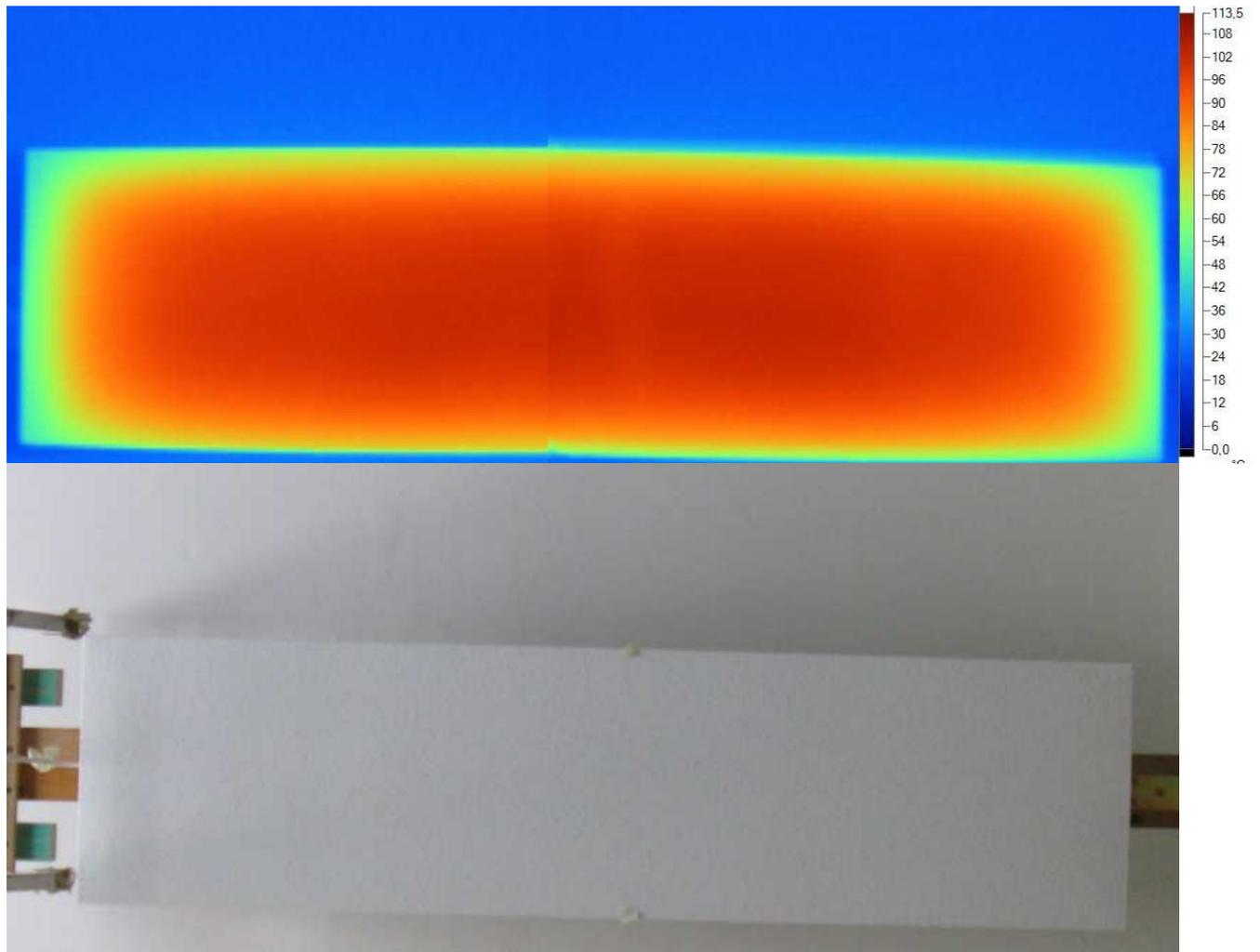
Wärmebild 1: Heizkörper Nr. 1 vertikal frei im Raum, quer liegend



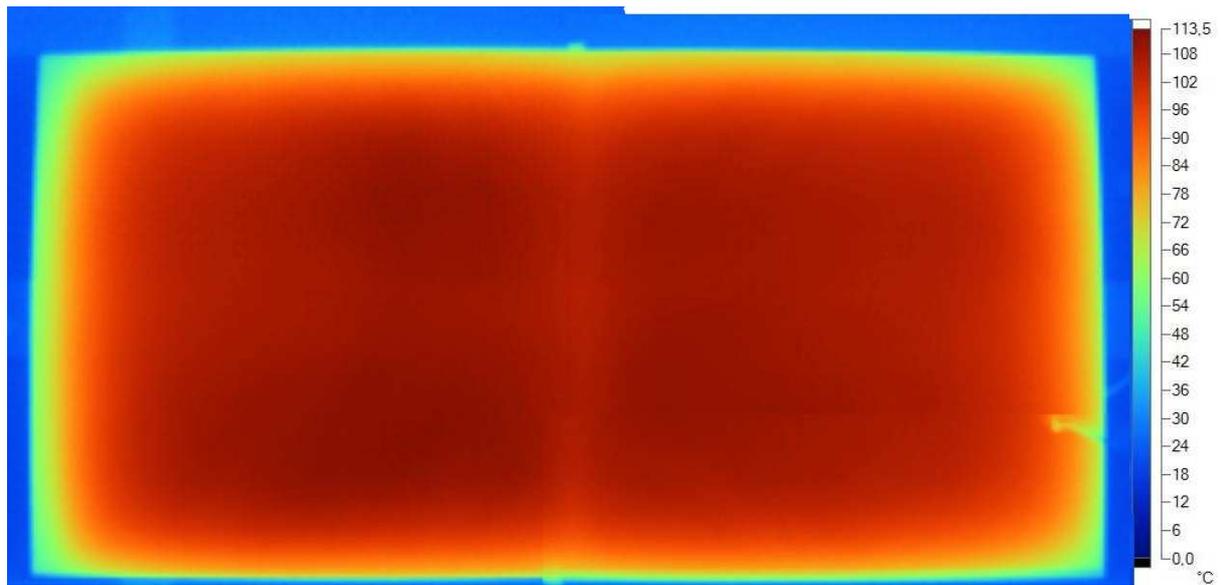
Wärmebild 2: Heizkörper Nr. 1 vertikal frei im Raum, quer liegend, von hinten (ohne Fotografie)



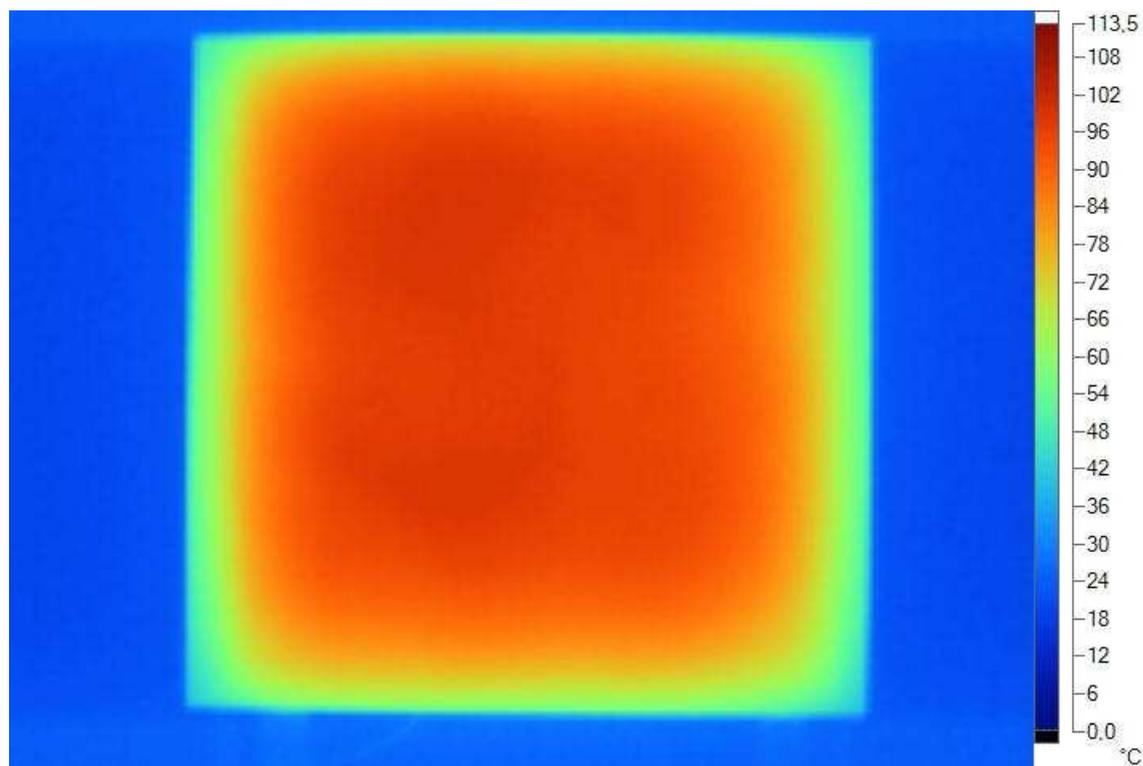
Wärmebild 3: Heizkörper Nr.1 vertikal frei im Raum, aufrecht stehend



Wärmebild 4: Heizkörper Nr. 1 horizontal, unter der Decke



Wärmebild 5: Heizkörper Nr. 2 horizontal, unter der Decke



Wärmebild 6: Heizkörper Nr. 3 vertikal, frei im Raum (ohne Fotografie)

4.6 Auswertung der Messungen

Gemäß den Rechenvorschriften aus Kapitel 3 wurden aus den ermittelten Temperaturmatrizen der Heizkörperoberflächen die durch Infrarotstrahlung von der Vorderfläche in den Raum durch Strahlungsaustausch abgegebene Leistung $P_{S,Raum}$ bestimmt. Als Quotient aus $P_{S,Raum}$ und der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} ergibt sich der Einfache Strahlungswirkungsgrad $\eta_{S,Raum}$.

Heizkörper	Anordnung	T_{max} [°C]	P_{el} [W]	$P_{S,Raum}$ [W]	$\eta_{S,Raum}$
1	vertikal frei im Raum, quer liegend	92,5	330	151	45,9%
1	vertikal frei im Raum, aufrecht stehend	94,0	330	153	46,5%
1	horizontal, unter der Decke	104,1	335	192	57,2%
2	horizontal, unter der Decke	112,4	627	408	65,1%

Bei der horizontalen Anordnung der Heizkörper unter der Decke liegt der einfache Strahlungswirkungsgrad $\eta_{S,Raum}$ mit 57% bzw. 65% erwartungsgemäß höher als bei der vertikalen Anordnung frei im Raum (ca. 46%). Bei Heizkörper Nr. 2 ist aufgrund der

kompakteren Bauweise der Anteil der über den Rand abgegebenen Strahlung geringer als bei Heizkörper 1. Durch die längliche Bauweise von Heizkörper 1 wird zudem die Luftkonvektion gefördert, was vermutlich auch zu einem höheren Konvektionsanteil der Wärmeabgabe führt. Zudem ist das Verhältnis aus elektrischer Leistungsaufnahme und Oberfläche größer. Dadurch wird eine höhere Oberflächentemperatur und somit ein etwas höherer Strahlungsanteil erzielt. Der mit 65% gegenüber 57% höhere Einfache Strahlungswirkungsgrad von Heizkörper 2 gegenüber Heizkörper 1 kann somit erklärt werden.

4.7 Abschätzung der Messungenauigkeit

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Messfehler bzw. der Ungenauigkeit der Messgeräte auf die Genauigkeit der Ergebnisse untersucht.

Die Eingangsgrößen der Berechnung waren

1. die Temperaturmatrizen der Heizkörperoberfläche
2. die Oberflächentemperatur der Raumwände
3. die elektrische Leistungsaufnahme.

In die Berechnung der Strahlungsleistung fließen die Messung der Wandtemperatur sowie die Bestimmung der Temperaturmatrizen mittels der Thermokamera ein. Dabei wird die bestimmte Strahlungsleistung nach oben verfälscht, falls die Messung der Thermokamera zu hohe Wert ergibt, oder falls die Messung der Wandtemperatur zu niedrige Werte ergibt. Den maximalen Fehler der Messung der Strahlungsleistung nach oben kann man also abschätzen, indem man die Temperaturmatrix des Heizkörpers um die Genauigkeit der Thermokamera nach oben korrigiert und gleichzeitig die angesetzte Wandtemperatur um den entsprechenden Messfehler nach unten korrigiert. Der Messfehler der Kamera beträgt 2K. Der Fehler der Messung der Wandtemperatur wurde mit ca. 1K angenommen.

Der Messfehler des Strommessgerätes beträgt laut Hersteller $\pm 1W \pm 1\%$. Dazu kommt noch eine Abweichung von ca. $\pm 1W$ resultierend aus Netzschwankungen, sodass der Fehler insgesamt $\pm 2W \pm 1\%$ beträgt.

Nachfolgend wird für die einzelnen Messungen die Auswirkung der genannten Messfehler auf den bestimmten einfachen Strahlungswirkungsgrad bestimmt. Die Angaben in der nachfolgenden Tabelle sind %-Punkte, d.h. absolute Größtfehlerabweichungen vom Mittelwert $\eta_{S,Raum}$.

HK-Nr.	Anordnung	$P_{el,max}$ [W]	$P_{S,Raum,min}$ [W]	$\eta_{S,Raum,min}$	$P_{el,min}$ [W]	$P_{S,Raum,max}$ [W]	$\eta_{S,Raum,max}$	$\eta_{S,Raum}$	
1	vertikal frei im Raum, quer liegend	335	142	42,5%	325	161	49,5%	45,9%	+3,6%
									-3,4%
1	vertikal frei im Raum, aufrecht stehend	335	144	43,1%	325	163	50,1%	46,5%	+3,6%
									-3,5%
1	horizontal, unter der Decke	340	182	53,5%	330	202	61,2%	57,2%	+3,9%
									-3,8%
2	horizontal, unter der Decke	635	390	61,4%	619	427	69,0%	65,1%	+3,8%
									-3,7%

Der Bestimmungsfehler des Einfachen Strahlungswirkungsgrades bedingt durch systematische und zufällige Messfehler liegt damit unter 4 Prozentpunkten.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Verifizierung

In der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse nochmals zusammengefasst:

HK-Nr.	Heizkörper-Maße (cm)	Nennleistung (W)	Anordnung	Einf. Strahlungswirkungsgrad	
1	B: 125 H: 32,2 T: 3	330	vertikal frei im Raum, quer liegend	45,9%	+3,6%
					-3,4%
1	B: 32,2 H: 125 T: 3	330	vertikal frei im Raum, aufrecht stehend	46,5%	+3,6%
					-3,5%
1	B: 125 H: 32,2 T: 3	330	horizontal, unter der Decke	57,2%	+3,9%
					-3,8%
2	B: 119 H: 59 T: 3	600	horizontal, unter der Decke	65,1%	+3,8%
					-3,7%

Ausgehend von den Bestimmungsunschärfen der verwendeten Messgeräte wurden die Größtfehlerabweichungen – hier in Prozentpunkten angegeben – berechnet. Die bestimmten Einfachen Strahlungswirkungsgrade stimmen gut mit den Erfahrungen eigener Messungen und den Angaben in der Fachliteratur überein:

Einschlägige Literatur, wie das Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik von Recknagel, Sprenger, Schramek (Oldenbourg Verlag 1995), geben für lackierte 1-Platten-Heizkörper ohne Konvektionsrippen einen Strahlungsanteil in den Raum von 38% an. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Heizkörper keine Dämmung zur Wand haben.

Aus eigenen Messungen können wir folgende Richtwerte angeben:

- Marmor- oder Natursteinheizkörper,
ohne Rückseitige Dämmung: 25....35%
- Elektroheizkörper (Glas, Marmor, beschichtetes Metall etc.),
rückseitig gedämmt: 40....50%
- Elektroheizkörper (Glas, Marmor, beschichtetes Metall etc.),
rückseitig gedämmt, montiert unterhalb der Decke: 55....75%

Diese Werte wurden hier mit den Messungen gut reproduziert. Sie liegen in dem mittleren Bereich für die rückseitig gedämmten Heizkörper. Gleichzeitig sind die jeweils angegebenen Bestimmungsfehler zu beachten, wodurch die Rangordnung in einer bestimmten Typklasse noch etwas relativiert wird.

Außerdem möchten wir darauf hinweisen, dass der Strahlungsanteil eines Heizkörpers wesentlich von seiner Lage im Raum abhängt. Die ersten 3 Bestimmungswerte betreffen alle denselben Heizkörper. Höhere Werte beim Einfachen Strahlungswirkungsgrad lassen sich ggf. noch erreichen, wenn bei der horizontalen Lage der Abstand zur Decke weiter minimiert werden. In dieser Anordnung dürfte der konvektive Anteil der Wärmeabgabe noch weiter sinken.

Mit diesem Zwischenergebnis zeigt sich schon der Nutzen dieses einfachen Vergleichsprüfverfahrens: Es lassen sich verschiedene Lagen eines Heizkörpers direkt bezüglich des Strahlungswirkungsgrades vergleichen.

Analog kann man Heizkörper einer bestimmten Typklasse miteinander vergleichen, z.B. mit Variation der Dämmstoffdicke, der Oberflächenbeschichtung, der Form etc. Da die Messung stets von der Qualität des Messraumes abhängt, sollten Untersuchungen zum direkten Qualitätsvergleich am gleichen Tag gemessen werden.

6 Bewertung des vereinfachten Vergleichsprüfverfahrens und Fazit

Wie in den Abschnitten 3 und 5 ausgeführt, eignet sich das hier beschriebene Vergleichsprüfverfahren gut für Vergleiche und für Optimierungen von Strahlungsheizungen, da letzten Endes genau der Strahlungsanteil bewertet wird, welcher am stärksten die positiven Effekte einer Strahlungsheizung beeinflusst:

→ Der Austausch über Strahlung senkrecht von und zur Vorderfläche des Heizkörpers

Der im Abschnitt 3 beschriebene kleine Modellfehler durch idealisierte Annahmen und durch Vernachlässigung sehr kleiner Größen in der Berechnung hat für eine Vergleichsbewertung nur untergeordnete Bedeutung, weil der Modellfehler stets in die gleiche Richtung wirkt.

Werden Vergleichsmessungen kurz hintereinander am gleichen Ort und mit den gleichen Messgeräten durchgeführt, wirken auch hier die systematischen Fehler alle in die gleiche Richtung.

Insofern ist es auch zu empfehlen, einen gemeinsamen Messraum einzurichten, um zum Beispiel Heizkörper unterschiedlicher Herkunft und Bauart zu vergleichen. Wird die gleiche Messtechnik eingesetzt, haben die systematischen Fehler der Messgeräte nur noch eine geringere Bedeutung auf die Vergleichswerte.

Die Kosten für einen solchen Messraum können bei akzeptabler Bestimmungsgenauigkeit im Vergleich sehr niedrig gehalten werden, so dass das Verbandsziel, eine einheitliche Qualitätsbewertung zu schaffen, auf einen guten Weg gebracht werden kann. Die Abschnitte 2 und 3 dieses Berichtes könnten den Basistext für eine interne Verbandsnorm bilden.