

## Meßverfahren zur Erfassung des IR-Strahlungsfeldes im Raum

H.H.Rüttinger u. H.Matschiner

Die Entwicklung der Heizungstechnik vom offenen Feuer, Kamin, Kachelofen, Zentralheizung bis zur Umluftheizung und Klimaanlage hat zu einer Verlagerung der Wärmeübertragung von der direkten Wärmestrahlung zur konvektiven Wärmeübertragung durch die Luftströmung im Raum geführt. Dies hat einige technische Vorteile, bringt aber auch Nachteile mit, die sich auf die „Behaglichkeit“ solchermaßen beheizter Räume auswirkt.

Die erhöhte Luftströmung wirbelt Staub auf und verbreitet damit an den Staub gebundene Allergene und Krankheitskeime. Durch die Erwärmung sinkt die relative Luftfeuchtigkeit im Raum, die anschließende Abkühlung an kalten Ecken oder in schlecht zugänglichen Strömungskanälen kann aber wieder zur Unterschreitung des Taupunkts führen, was einer Schimmelbildung an diesen Stellen Vorschub leistet. Eingehende Untersuchungen, besonders von B. Glück [1] haben gezeigt, dass für ein behagliches Raumklima ein ausgewogenes Verhältnis von Konvektion und Strahlungswärme notwendig ist. Dabei kann die Lufttemperatur bis zu 5 Grad unter der gefühlten Raumtemperatur liegen, wenn eine entsprechend hohe Wärmestrahlung am Aufenthaltsort vorhanden ist. In Abbildung 1 sind die Zusammenhänge dargestellt.

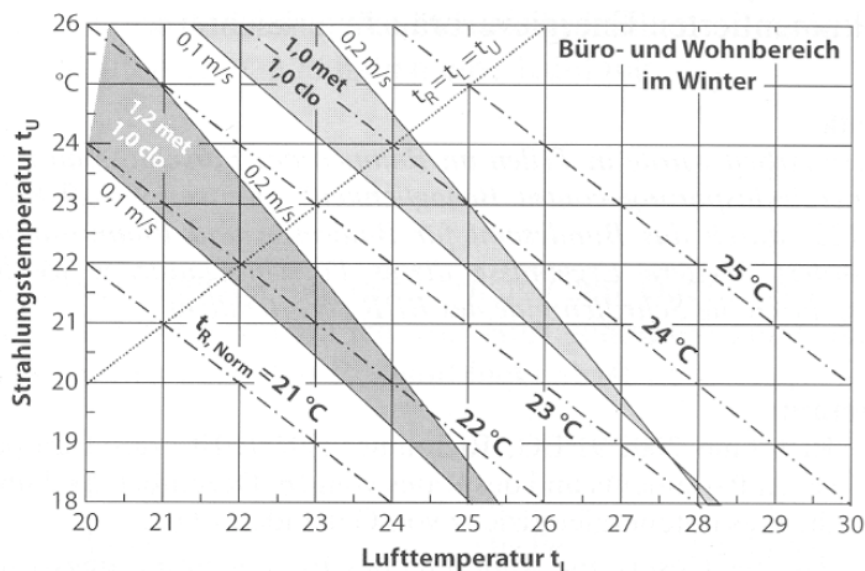


Abbildung 1: Behaglichkeitsbereich in Abhängigkeit von Luft- und Strahlungstemperatur, nach [1]

Unter Umständen kann so häufig Energie mit geringem Aufwand eingespart werden. Bei der praktischen Ausführung ergeben sich indessen viele Fragen: Welche Heizelemente sollen verwendet werden?

Wie wird der Raum genutzt?

Welchen Einfluss haben Wände, Fenster Türen und Möbel?

Computerprogramme, die die Simulation des Strahlungsfeldes und der konvektiven Wärmebilanz erlauben [2] sollten hier eine große Hilfe sein, verschiedene Varianten erst einmal virtuell zu testen. Die Simulation erfordert jedoch die Eingabe vieler Größen, wie Wärmekapazitäten und Wärmedurchgangszahlen, Reflexion und Reemission der Möbel, Wände, Vorhänge usw. die zum Teil nur sehr grob abgeschätzt werden können.

Daher ist es für die Nutzung und Weiterentwicklung der Rechenprogramme wichtig, die erhaltenen Daten messtechnisch zu verifizieren.

Ein zur Zeit übliches Verfahren ( DIN EN ISO 27726) ist die Bestimmung der operativen Raumtemperatur mit einem Globalthermometer, einer Kugel von etwa 150 mm Durchmesser, deren Oberfläche einen Strahlungskoeffizienten von 0,95 ( bezogen auf den schwarzen Strahler) und eine der menschlichen Haut vergleichbare Wärmeübertragung durch Luftströmung aufweist.

Die Temperatur, die die Kugel im Raum annimmt ist ein gewichteter Mittelwert aus Lufttemperatur und Strahlungstemperatur und wird mit der behaglichen Raumtemperatur in Zusammenhang gebracht.

Angesichts der komplexen Einflussgrößen sind solche Messungen unbefriedigend.

Für Anwender von IR-Flächenstrahlern ist primär die Wirkung dieser Strahler auf das Raumklima interessant.

Wir schlagen daher zur detaillierten Erfassung der Wärmestrahlung die Abtastung des Raums mit einem IR-Sensor vor.

Wenn sich ein Mensch an einer bestimmten Stelle im Raum befindet, sollte das umgebende Wärmestrahlungsfeld besonders in Kopfhöhe relevant sein. Die Messung der auf den Raumwinkel bezogenen Strahlungsleistung ( oder der entsprechenden Strahlungstemperatur nach der Stefan-Boltzmann-Gleichung) sollte im gesamten Raum erfolgen, also 360° umfassen.

Neben der mittleren Strahlungstemperatur ist auch eine winkelaufgelöste Messung wichtig, um die Gleichmäßigkeit der Strahlung beurteilen zu können, denn eine sehr unsymmetrische Strahlungsverteilung ( Beispiel: Kamin mit angenehmer Wärme von vorn aber mit kaltem Rücken) wird oft als unangenehm empfunden.

Untersuchung dazu in [3].

Prinzipiell sind für solche Messungen Wärmebildkameras geeignet, jedoch haben sie nur ein sehr begrenztes Blickfeld, falls nicht spezielle teure Optiken verwendet werden. Die Kameras selbst sind immer noch sehr teuer und ihre hohe Flächenauflösung wird für unsere Zwecke auch nicht gebraucht.

Die sehr preiswerten IR-Thermometer messen die Oberflächentemperaturen ebenfalls über die Strahlungsleistung, die sich aus der angezeigten Temperatur auch wieder exakt zurückrechnen lässt, da die Geräte meist eine fest eingestellte Strahlungseffektivität zum Schwarzen Strahler in Rechnung setzen.

Die Winkelauflösung ist mehr als ausreichend und könnte im Interesse einer schnelleren Messung verringert werden.

So ist es auch möglich, dynamische Vorgänge, wie Aufheizen und Abkühlen der Flächen im Raum sowie das Regelverhalten der Heizungsanlage zu untersuchen. Zur Demonstration der Vorteile einer solchen Messung wurde ein Prototyp eines solchen Panoramasensors aufgebaut und im praktischen Versuch mit IR-Heizern erprobt.

#### **Aufbau des Panoramasensors:**

Ein IR-Sensor mit Thermosäule und integrierter Auswerteelektronik der Firma Melexis wurde auf ein Stativ mit einer Mechanik zum Drehen in der Horizontalen und Kippen in der Vertikalen montiert. Die Bewegung des Sensors erfolgt dabei in beiden Richtungen durch je einen Schrittmotor. Die Steuerung der Schrittmotore und auch die Datenerfassung erfolgt mit Hilfe eines Mikrokontrollers, der über ein USB-Interface an einen PC angeschlossen wurde.

Der Mikrokontroller liefert die Messungen direkt als Text mit Winkel und Temperaturangaben. Das PC-Programm startet jeweils eine Messung und legt diese mit Zeitangabe auf der Festplatte ab.

Abb. 2 zeigt ein Foto des Messaufbaus.



**Abbildung 2: Messaufbau**

Der IR-Sensor hat nach Datenblatt einen Öffnungswinkel von  $60^\circ$ . Zur Abtastung wurden Schritte von  $36^\circ$  Drehwinkel und  $18^\circ$  Kippwinkel eingestellt, damit ergeben sich genügend überlappende Messbereiche bei einer Gesamtdauer der Messung von knapp 3 Minuten. Durch Optimierung der Schritte ließe sich diese Zeit noch wesentlich verkürzen.

**Messungen:**

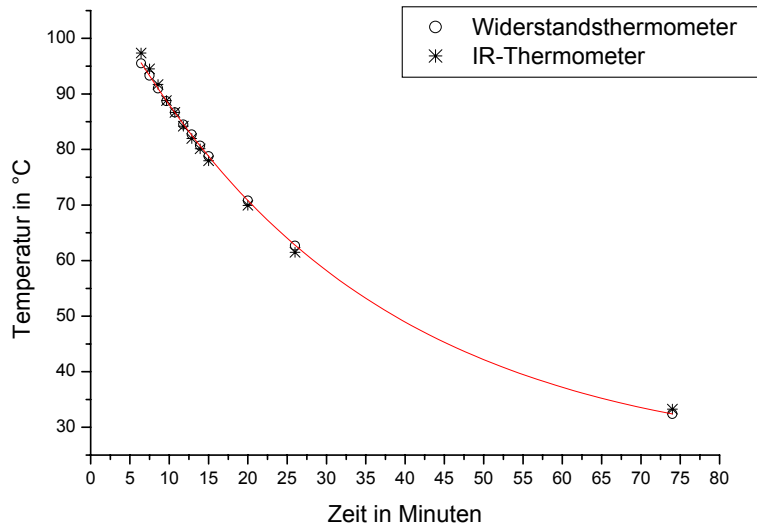
Zunächst wurde der IR-Sensor überprüft. Werksseitig ist dieser Sensor auf eine Strahlungseffektivität von 1 in Bezug auf einen schwarzen Strahler eingestellt. Im Wellenlängenbereich von  $7\text{-}14\ \mu\text{m}$  kommt eine Rußschicht diesen Gegebenheiten recht nahe.

Ein Eisenquader mit folgenden Abmessungen:  $79.5 \times 40 \times 20\ \text{mm}$ , Gewicht :  $m=493.14\text{g}$

Wärmekapazität:  $c_p=0.439\ \text{J/g} \cdot \text{K}$  (reines Eisen) wurde erhitzt und als IR-Strahler benutzt.

Die Vorderseite  $79.5 \times 40\ \text{mm} = 31.8\ \text{cm}^2$  wurde mit Ruß beschichtet. An dieser Schicht wurde mit dem IR-Thermometer gemessen. Aus der Differenz der Strahlungstemperatur  $60.7\ ^\circ\text{C}$  und  $46.8\ ^\circ\text{C}$  entsprechend beschichteter und unbeschichteter Fläche wurde bei Annahme von  $\epsilon=1$  für die beschichtete Fläche ein  $\epsilon=0.61$  für die unbeschichtete Fläche berechnet.

Die Abkühlkurve wurde mit IR Sensor und Widerstandsthermometer (Abb. 3) verfolgt. Das Mini-Widerstandsthermometer wurde dabei unter dem Eisenquader, der zur Isolation auf einen Topflappen gestellt wurde, platziert.



**Abbildung 3: Abkühlkurve des Eisenquaders**

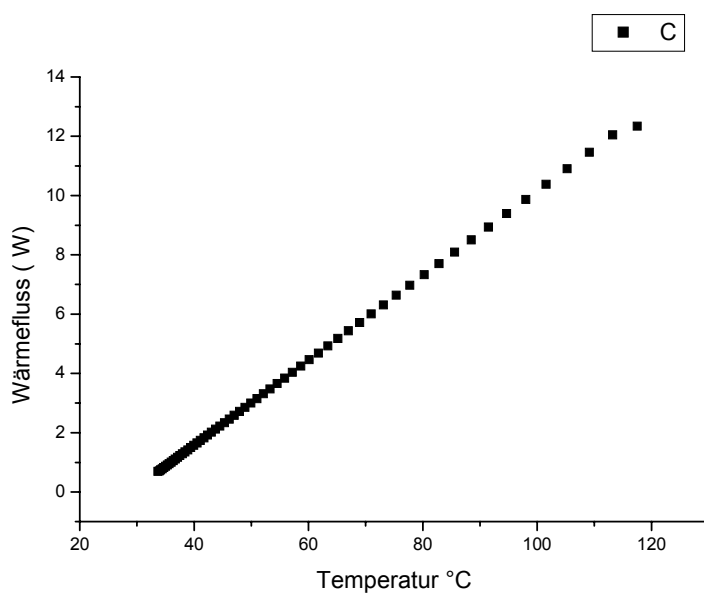
Die Abweichungen sind gering und werden hauptsächlich durch tatsächliche Temperaturdifferenzen an den Messstellen hervorgerufen.

Der Wärmefluss wurde wie folgt berechnet:

$$W = c_p \cdot m \cdot \frac{dT}{dt}$$

$c_p$ : spezifische Wärme

$m$ : Masse



**Abbildung 4: Temperaturabhängigkeit des Wärmeflusses**

Der Wärmefluss war nahezu linear von der Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur abhängig und der Anteil der Wärmestrahlung betrug etwa 47%.

Die Panoramamessungen wurden in einem während der Osterfeiertage unbenutztem Raum in der Kelleretage ohne zusätzliche Heizung durchgeführt.

Der Raum hat folgende Abmessungen.

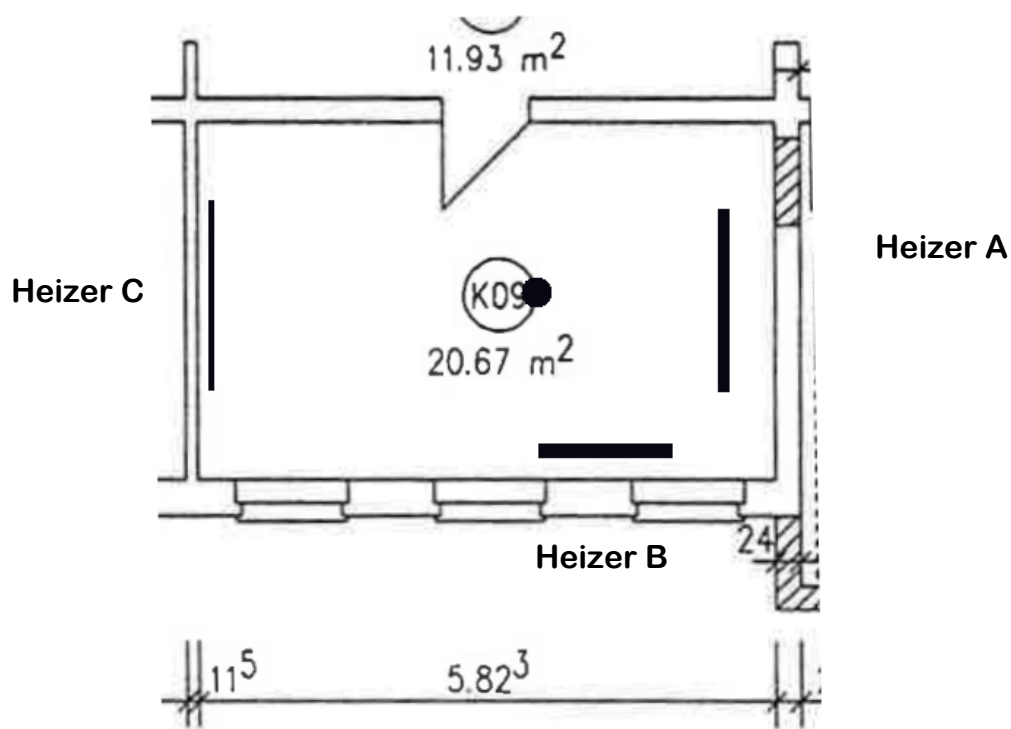


Abbildung 5: Grundriss des Versuchsraums, Höhe 249 cm



Abbildung 6: Panoramafoto des Versuchsraums

A:  $125 \times 32 \text{ cm} = 4000 \text{ cm}^2$  330W

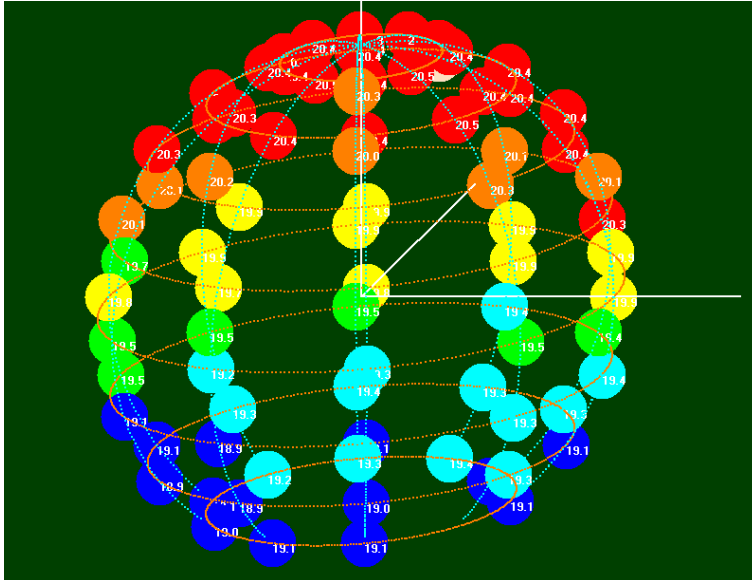
B:  $61 \times 61 \text{ cm} = 3721 \text{ cm}^2$  300W

C:  $119 \times 51 \text{ cm} = 6069 \text{ cm}^2$  600 W

Hersteller der Heizkörper: DER MARTE, Widdermoss 15, CH-9466 Sennwald

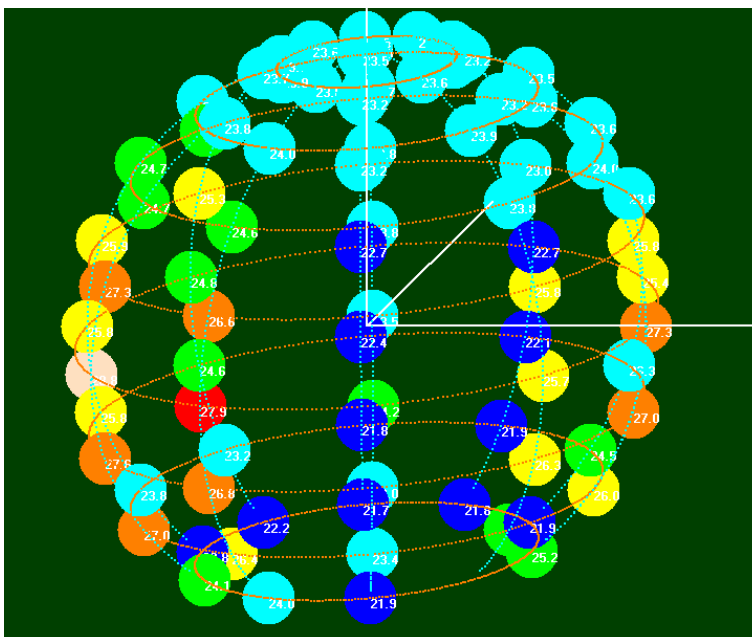
Die Heizungen wurden mit einer Schaltuhr periodisch ein- und ausgeschaltet und der Raum alle 12 Minuten gescannt.

Bei ausgeschalteter Heizung ist die Temperatur sehr gleichmäßig verteilt, die Decke ist erwartungsgemäß wärmer als der Fußboden.

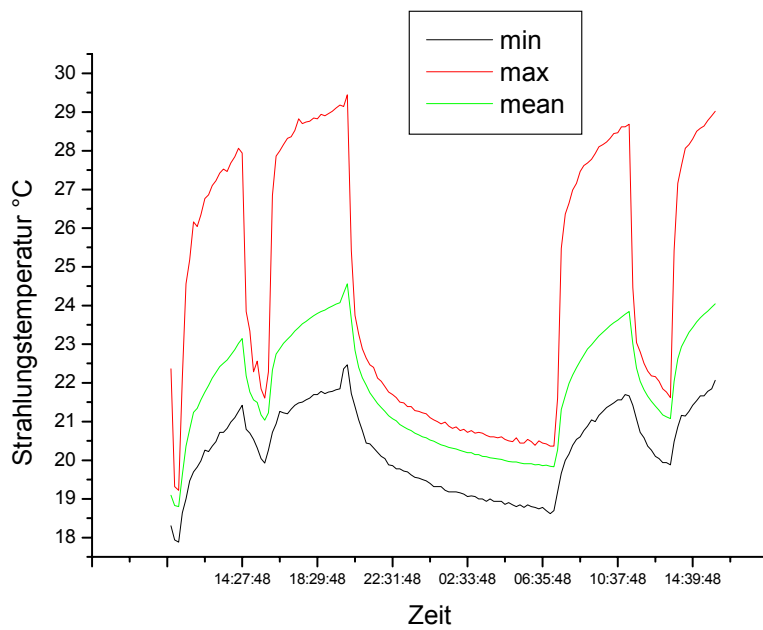


**Abbildung 7: Temperaturverteilung bei ausgeschalteter Heizung**

Wird die Heizung eingeschaltet, ist die Strahlungstemperatur in Richtung der Strahler größer. Der Ablauf kann direkt aus den Temperaturkurven abgelesen werden.



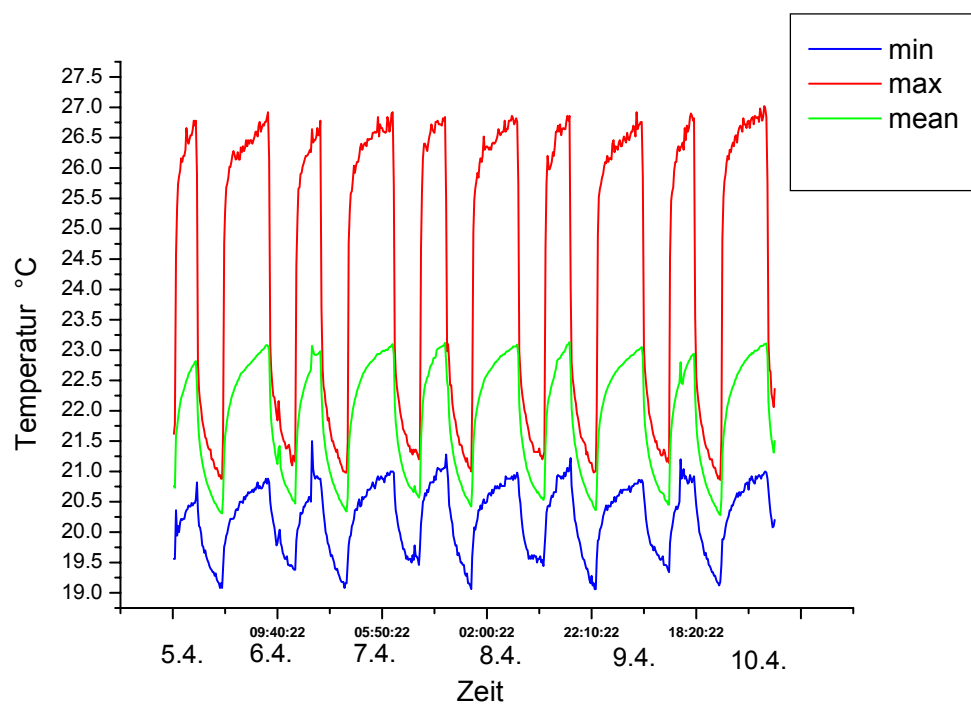
**Abbildung 8: Temperaturverteilung bei eingeschalteter Heizung**



**Abbildung 9: Temperaturverlauf**

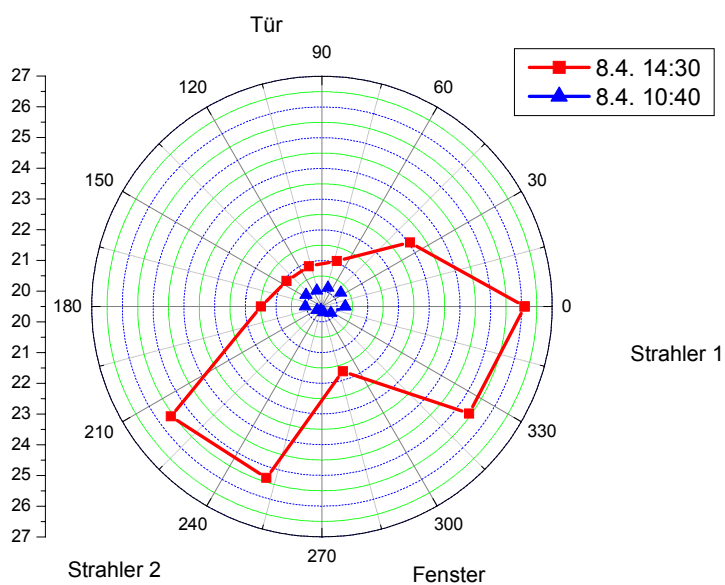
Abb. 9 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur. Während die Strahler sehr schnell aufgeheizt werden und auch schnell wieder abkühlen, folgt die durchschnittliche Strahlungstemperatur des Raums nur langsam. Für die folgenden Versuche wurden die Heizleistung verringert und nur die beiden Strahler A und B benutzt. Die Daten wurden über 5 Tage aufgezeichnet.



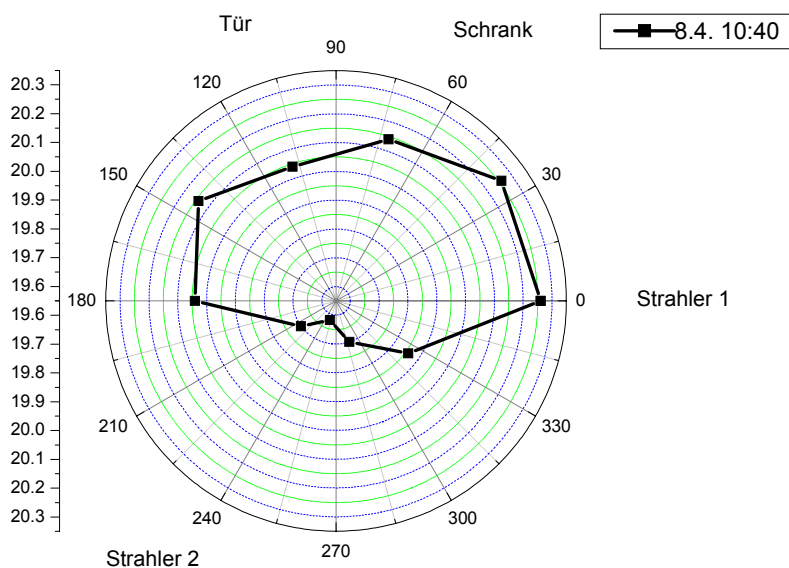


**Abbildung 10: Temperaturverlauf über 5 Tage**

Zur Auswertung der Symmetrie des Strahlungsfeldes sind Polarkoordinaten anschaulicher. Es wurden nur die in der Waagerechten,  $-18^\circ$ , schräg nach unten aufgezeichneten Messungen in Abb. 11 und Abb. 12 verwendet



**Abbildung 11: 8. April 10:40 Uhr: Heizung seit 2.5 Stunden aus**



**Abbildung 12: Vergrößerung aus Abb. 11 Heizung aus**

### **Diskussion:**

Mit dem hier vorgestellten Panorama-IRsensor lässt sich das globale Strahlungsfeld in einem Raum sowohl zeitlich als auch räumlich erfassen, die Effektivität der Heizung, aber besonders die Behaglichkeit messen und aus den dynamischen Parametern können sicher vielfältige Daten für Simulationsrechnungen gewonnen werden, insbesondere auch über Wärmekapazität und Strahlungseigenschaften der Wände und der Einrichtungsgegenstände eines Raums. Eine direkte Messung im Nahfeld eines IR-Strahlers ist auch möglich.

- 
- <sup>1</sup> B. Glück      Ein Vorschlag zur verbesserten Darstellung und Messung der operativen Raumtemperatur  
Gesundheitsingenieur-Haustechnik-Umwelttechnik 127, 76 (2006)
- <sup>2</sup> B. Glück      Simulationsmodell „Dynamisches Raummodell zur Wärmetechnischen und umweltphysiologischen Bewertung“  
<http://berndglueck.de/raummodell.php>
- <sup>3</sup> B. Glück      Zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie  
Gesundheitsingenieur-Haustechnik-Umwelttechnik 115, 285 (1994)