

## SIMULATION LOKALER STRALUNGSTEMPERATURASYMMETRIEN IN INNENRÄUMEN

J. Frisch<sup>1</sup>, C. van Treeck<sup>2</sup>, M. Grahovac<sup>3</sup>, P. Liedl<sup>4</sup>, R.-P. Mundani<sup>1</sup>, M. Pfaffinger<sup>1</sup>,  
 P. Tzscheuschler<sup>3</sup> und E. Rank<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Computation in Engineering, TU München, D-80290 München

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen, D-83626 Valley

<sup>3</sup> Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, TU München, D-80290 München

<sup>4</sup> Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, TU München, D-80290 München

### KURZFASSUNG

In der Planungsphase eines Gebäudes wird dem thermischen Komfort mittlerweile ein sehr großer Stellenwert beigemessen. Dabei ist die Bestimmung von Komfortwerten und -indizes nicht immer eindeutig. Ein Aspekt bei der lokalen thermischen Komfortbewertung ist beispielsweise die in EN ISO 7730 beschriebene Bestimmung einer asymmetrischen Temperaturstrahlungsdifferenz. Die simulationstechnische Bestimmung dieses Wertes ist jedoch weder hinreichend beschrieben, noch dokumentiert. Dieser Beitrag beschreibt das generelle Vorgehen, um die Strahlungstemperaturasymmetrie anhand von Simulationsergebnissen zu bestimmen und auszuwerten. Anschließend wird ein Beispiel mit dieser Methode berechnet und die Ergebnisse dargestellt.

### ABSTRACT

Nowadays, evaluation of thermal comfort in early design stages of building projects gains more and more significance. Unfortunately, the computation of thermal comfort indices regarding local effects such as thermal asymmetric radiation differences as mentioned in EN ISO 7730 are not well documented. This article describes a general simulation procedure to evaluate asymmetric thermal radiation differences from input data of simulation programs. An example is shown in this paper and the obtained results are discussed.

### EINLEITUNG

Thermischem Komfort wird heutzutage bereits in frühen Planungsphasen eine sehr große Rolle beigemessen. Dabei ist es von großer Bedeutung, frühzeitig alle physikalisch auftretenden Effekte zu berücksichtigen, wobei lokalen Gegebenheiten, wie beispielsweise in Abschnitt 6 der EN ISO 7730 (2005) beschrieben, besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte.

Die Indizes PMV (predicted mean vote) sowie PPD (predicted percentage of dissatisfied) können nur ein globales Votum für den Körper als Ganzes ausdrücken (EN ISO 7730). Lokale thermische Unzufriedenheit kann allerdings auch aus Effekten auf einzelne Körperteile auftreten. Als Beispiele solch lokaler

Effekte können Strahlungsasymmetrie, Zugluft, ein vertikaler Lufttemperaturunterschied oder warme und kalte Fußböden genannt werden.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Simulation von lokalen Strahlungstemperaturasymmetrien als Aspekt der lokalen thermischen Behaglichkeitsbewertung in Innenräumen. EN ISO 7730 erläutert, dass vor allem asymmetrische Wärmestrahlung durch warme Decken und kalte Wände oder Fenster als unangenehm empfunden wird. Die Norm liefert Auswertungsschemata, um den Prozentsatz unzufriedener Personen anhand der asymmetrischen Strahlungstemperaturdifferenz zu bestimmen. Allerdings ist die korrekte Bestimmung dieser Differenz nicht trivial, da viele Faktoren eine Rolle spielen.

Im Beitrag wird eine Methodik vorgestellt, diese Temperaturdifferenzen effizient anhand eines Geometrie-basierten Simulationsmodells zu bestimmen und die Auswertung geometrisch im Bezug auf den Ausgangsraum darzustellen. Als Simulationsgrundlage wird eine ganzjährige zonale Gebäudesimulation genutzt, wie sie in Clarke (2001) oder van Treeck (2010) vorgestellt wurde. Damit ist es möglich, die Strahlungstemperaturasymmetrie zu jedem Zeitpunkt an jedem Ort im Raum zu berechnen und anhand der Auswertungsmethoden der EN ISO 7730 quantitativ zu bewerten.

### SIMULATION

#### **Zonale Gebäudesimulation**

Grundlage der Berechnung bietet eine thermische Gebäudesimulation, wie in Clarke (2001) und van Treeck (2010) vorgeschlagen. Hierzu wird ein Gebäudemodell geometrisch modelliert. Die numerische Diskretisierung basiert auf einem Finiten-Volumen-Ansatz und ermöglicht den Zugriff auf sämtliche Raum- und Wandtemperaturen. Detaillierte Wetterdaten liefern Angaben bezüglich Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Bedeckungsgrad und direkter sowie diffuser Strahlungsintensität über ein ganzes Jahr. Ein Raytracing-Verfahren zur Strahlverfolgung sorgt für eine korrekte Verteilung der direkten kurzwelligigen Solarstrahlung im Raum. Mithilfe eines Radiosity-Verfahrens wird die langwellige thermische Strahlung, die von den Wänden emittiert wird, auf

alle anderen „sichtbaren“ Objekte im Raum verteilt. Die kurzwellige diffuse Solarstrahlung wird ebenfalls nach diesem Prinzip innerhalb des Raumes verteilt. Da die langwellige Strahlungsberechnung direkt von den Oberflächentemperaturen abhängt, müssen interne Iterationsschritte durchgeführt werden, um eine Konvergenz des gesamten Verfahrens sicherzustellen. Dementsprechend sind nach einer Konvergenz der Lösung zu jedem Zeitschritt die Oberflächentemperaturen bekannt, womit die Bestimmung der Strahlungstemperaturasymmetrie in einer Nachlaufrechnung erfolgen kann.

### Ausgangsdaten

Ausgangsdaten für eine Simulation bildet der in der VDI 6020 (2001) beschriebene Testraum (Variante „schwer“), mit dem ebenfalls das benutzte zonale Gebäudesimulationsmodell in van Treeck et al. (2009a) validiert wurde.

## METHODE

### Beschreibung

Die Strahlungstemperaturasymmetrie  $\Delta t_{pr}$  wird in Abschnitt 6.5 der EN ISO 7730 benutzt, um einen Prozentsatz an Unzufriedenen bei bestimmten Konstellationen abzuschätzen. In EN ISO 13731 wird die Asymmetrie der Strahlungstemperatur in Abschnitt 2.87 als „Differenz zwischen den Flächenstrahlungstemperaturen von zwei diametralen Seiten eines kleinen Flächenelementes“ definiert. Die Flächenstrahlungstemperatur ist in Absatz 2.77 definiert als die „gleichmäßige Temperatur eines Raumes, in dem der einfallende Strahlungsfluss auf der einen Seite eines kleinen Flächenelementes mit dem der vorhandenen Umgebung identisch ist“.

Diese Definitionen helfen noch nicht besonders bei der eigentlichen Berechnung der Strahlungstemperaturasymmetrie. Glück (1982) schlägt vor, eine Berechnung des Strahlungsaustausches mit einem kleinen Quader an einem Auswertepunkt zu berechnen und anschließend den Quader um  $45^\circ$  zu drehen sowie eine erneute Berechnung auszuführen. Die Höhe auf der diese Untersuchung durchgeführt werden soll, beträgt 1,3 m für sitzende und 1,7 m für stehende Personen. Recknagel (2009) schlägt vor, diese Höhe auf 0,6 m für sitzende und 1,1 m für stehende Personen festzulegen.

Um die Berechnung der Strahlungsasymmetrie nicht zu jedem Zeitpunkt zweimal ausführen zu müssen, wird ein spezielles geometrisches Objekt benutzt, das in Abb. 1 zu sehen ist, und sämtliche Daten bei einem einzigen Simulationsdurchlauf liefern kann. Die Grundform besteht aus einem Achteck, das aus der Vereinigung eines Quaders mit einem um  $45^\circ$  gedrehten Quader erzeugt wird. Zusätzlich befindet sich noch jeweils ein Dreieck nach oben und nach

unten ausgerichtet an der Geometrie, um die Asymmetrien zwischen Decke und Fußboden ebenfalls zu bestimmen.

Wie in Abb. 1 zu sehen ist, muss das Objekt weder geschlossen, noch vollständig sein. Wichtig beim geometrischen Aufbau ist lediglich, dass sämtliche Normalenvektoren der Seitenflächen nach außen, des oberen Dreiecks nach oben, sowie des unteren Dreiecks nach unten zeigen. Diese Ausrichtung wird bei der Berechnung der geometrischen Strahlungsformfaktoren (view factor) benötigt. Eine effiziente Methode zur Berechnung der Strahlungsformfaktoren inklusive Algorithmen ist in Walton (2002) gegeben und wurde für diese Arbeit benutzt.

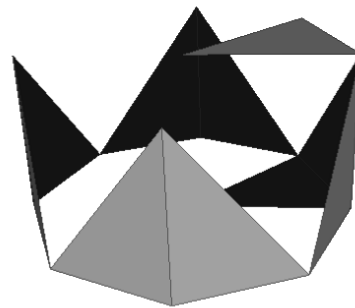


Abbildung 1: Geometrisches Objekt zur Strahlungstemperaturasymmetriestimmung

Für jeden auszuwertenden Punkt müssen dementsprechend unterschiedliche Strahlungsformfaktoren zwischen sämtlichen Raumboflächen und den Oberflächen des geometrischen Testobjektes berechnet werden. Je nach Anzahl der Auswertungspunkte kann dies sehr zeitaufwändig werden und die Rechenleistung reduzieren.

Für den Fall, dass sich die Geometrie während der Simulation nicht ändert, kann die Leistung jedoch deutlich erhöht werden, indem die Berechnung in zwei Teile aufgespalten wird. In einem ersten Teil werden sämtliche Strahlungsformfaktoren im Gesamttraum, inklusive geometrischem Testobjekt, berechnet. Allerdings werden für eine Auswertung nur diejenigen Formfaktoren benötigt, die das geometrische Testobjekt beinhalten. Die Sichtbarkeitsfaktoren zwischen Wänden und Decken etc. werden für die Strahlungsasymmetrie nicht benötigt und werden aus Effizienzgründen auch nicht abgespeichert (vergleiche ebenfalls Abb. 2). Dieser eben beschriebene, zeitaufwändige Teil läuft nur einmal in einer Preprocessing-Phase und wirkt sich in der anschließenden Berechnungsphase nicht auf die Leistung aus. In der eigentlichen Berechnungsphase werden dann lediglich die ermittelten Wärmeströme und Wandtemperaturen eingesetzt. Somit erhält man die zehn unbekanntes Oberflächentemperaturen des geometrischen Testobjektes.

## Oberflächentemperatur des Testobjektes

Die detaillierte Berechnung mittels der Radiosity-Methode ist in Modest (2003) ausführlich beschrieben. Hier werden lediglich die Grundgleichungen erläutert, um die Vorgehensweise zu verdeutlichen. Im Folgenden wird das geometrische Testobjekt an einen Punkt im Raum gesetzt, in dem die Temperatursymmetrie bestimmt werden soll.

Wird das Grundgleichungssystem der Radiosity-Methode umgeformt, so gilt

$$\frac{q_i}{\varepsilon_i} - \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right) q_j F_{ij} \right] = \sum_{j=1}^n [(E_{b,i} - E_{b,j}) F_{ij}] \quad (1)$$

wobei  $q_i$  und  $q_j$ ,  $i, j \in [1; n]$  die vorzeichenbehaftete Wärmestrahlung der Flächen  $i$  und  $j$  darstellen,  $\varepsilon_i$  und  $\varepsilon_j$  die Emissionskoeffizienten der Flächen beziffern,  $F_{ij}$  den Strahlungsformfaktor zwischen Fläche  $i$  und Fläche  $j$  darstellt und  $E_{b,i}$  und  $E_{b,j}$  die Schwarzkörper-eigenstrahlung der entsprechenden Fläche ausdrückt, für die gilt

$$E_{b,i} = \sigma \cdot T_i^4 \quad (2)$$

mit  $\sigma = 5,670 \cdot 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$  als Stefan-Boltzmann Konstante und  $T_i$  als der Oberflächentemperatur der Fläche  $i$ .

|           |           |                 |                                      |
|-----------|-----------|-----------------|--------------------------------------|
|           |           | $j$             |                                      |
|           |           | 1               | $n_{obj}$                            |
| 1         | 1         | geom.<br>Objekt | Sichtbarkeit<br>geom. Objekt -- Raum |
| $n_{obj}$ | $n_{obj}$ |                 |                                      |
| $i$       | $i$       |                 | Sichtbarkeit<br>Raum -- Raum         |
| $n$       | $n$       |                 |                                      |

Abbildung 2: Blöcke der Formfaktormatrix. Im oberen linken Block stehen ausschließlich Nullen, da sich die Flächen des geometrischen Testobjektes nicht gegenseitig sehen. Der benötigte (und gespeicherte Block) befindet sich oben rechts, und beinhaltet die Sichtbarkeitsinformationen zwischen geometrischem Objekt und dem Raum an sich.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, soll das geometrische Testobjekt über zehn Flächen verfügen ( $n_{obj} = 10$ ), die in der Berechnungsmatrix die Indizes 1 bis  $n_{obj}$  einnehmen sollen. Die restlichen Flächen des Berechnungsraumes folgen auf den Plätzen  $n_{obj} + 1$  bis  $n = n_{Raum} + n_{obj}$ . Diese Anordnung ist für den folgenden Ablauf von Bedeutung. Die vollständige

gespeicherte Matrix der Formfaktoren besitzt dann die Form, die in Abb. 2 dargestellt ist.

Per Definition ist das Testobjekt im Raum als Beobachter angeordnet und nimmt somit nicht am Strahlungsaustausch teil. Weiterhin sollen die Emissionskoeffizienten der Testflächen auf 1 gesetzt werden.

$$q_i \equiv 0 \quad \varepsilon_i \equiv 1 \quad \forall i \in [1; n_{obj}] \quad (3)$$

Formt man die Grundgleichung (1) nach diesen Maßgaben um und setzt die Formel für die Schwarzkörperstrahlung (2) ein, so ergibt sich folgende Form des Gleichungssystems

$$T_i = \left( \frac{1}{\sigma} \sum_{j=n_{obj}+1}^n \left\{ F_{ij} \left[ \sigma T_j^4 - \left( \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right) q_j \right] \right\} \right)^{1/4} \quad (4)$$

wobei lediglich für  $i$  die ersten  $n_{obj}$  Werte berechnet werden müssen und für  $j$  die ersten  $n_{obj}$  Werte nicht berücksichtigt zu werden brauchen, da  $F_{ij}$  dort Null ist (vergleiche Abb. 2).

Wurden die Formfaktoren, für die die Eigenschaft

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1 \quad (5)$$

gilt, berechnet und sind die Wärmeströme  $q_j$  sowie die Oberflächentemperaturen  $T_j$  des Raumes ( $j = n_{obj} + 1$  bis  $n$ ) aus der zonalen Simulation bekannt, so existieren keine Unbekannten mehr in dieser Gleichung und die Temperaturen können berechnet werden.

## Auswertung

Sind die Oberflächentemperaturen des Testobjektes bekannt, so kann durch einfache Differenz der entsprechenden gegenüberliegenden Flächentemperaturen – wie in der Norm beschrieben – eine Strahlungstemperatursymmetrie berechnet werden.

Es gibt nun mehrere Möglichkeiten. Entweder wird zwischen der Strahlungsasymmetrie von Decke zu Boden eine Differenz gebildet und gesondert angegeben und ein Maximalwert aus den restlichen Asymmetrien ermittelt, oder es wird ein Maximalwert aller Strahlungsasymmetrien gebildet und ausgewertet.

## Bemerkungen

Wie aus dem Berechnungsteil ersichtlich ist, ist die Bestimmung der Strahlungsasymmetrien nicht an ein spezielles Modell zur Simulation gekoppelt. Diese Tatsache ist unter anderem von den Autoren dazu benutzt worden, um anhand bestehender Simulationsergebnisse eines kommerziellen Programms Strahlungstemperatursymmetrien zu bestimmen.

Werden von den bestehenden Simulationsprogrammen die Oberflächenwärmeströme  $q_i$ , die zu den gegebenen Oberflächentemperaturen  $T_i$  führen, nicht

mit angegeben, so müssen in einem vorherigen Schritt die Grundgleichungen der Radiosity-Methode für den Raum an sich (d. h. ohne geometrisches Testobjekt) gelöst werden, um die unbekanntes Wärme-ströme zu bestimmen, die als Eingangsgröße für die Berechnung der Temperaturasymmetrien benötigt werden.

## ERGEBNISSE

### Simulationsgrundlagen

Folgende Berechnungen wurden mit einem zonalen Simulationsmodell durchgeführt, das am Lehrstuhl für Computation in Engineering der Technischen Universität München entwickelt und bereits in van Treeck et al. (2009a) anhand des VDI 6020 (2001) Testraumes validiert wurde. Wie bereits oben bemerkt, können auch andere Simulationsprogramme als Grundlage für eine thermische Komfortbewertung dienen.

Sämtliche Wände des VDI Testraumes in der Variante „schwer“ sind adiabatisch angeschlossen; es findet demnach kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Ausnahme bildet hier die vordere Wand, die gut gegen die Außenwelt isoliert ist sowie das fast raumgroße Fenster in dieser Wand.

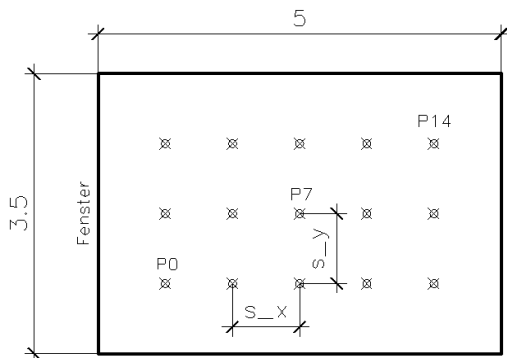


Abbildung 3: Definition der Rasterabstände  $s_x$  und  $s_y$  anhand der Rasterdiskretisierungen zur Berechnung der Asymmetrie im VDI 6020 Testraum.

Grundlage der Bestimmung der Strahlungstemperaturasymmetrie ist das Beispiel 13 mit Ausnahme der Simulationszeit. Hier wird der 11. August gewählt, für den die TRY5-Wetterdaten<sup>1</sup> einen besonders strahlungsintensiven Tag bereitstellen. Dort werden Untersuchungen zu mehreren Tageszeiten (8h, 12h, 20h, etc) mit unterschiedlichen Rasterdiskretisierung  $a_x$  und  $a_y$  zur Positionierung des geometrischen Testobjektes (siehe Abb. 3) sowie unterschiedlicher Größe  $r$  des Testobjektes an sich, durchgeführt. Dabei befindet sich die  $z$ -Ebene der berechneten Strahlungstemperaturasymmetrien auf 1,1 m über dem Boden,

<sup>1</sup> TRY5 : Wetterdaten als Testreferenzjahr für die Zone Würzburg; diese Wetterdaten bilden die Grundlage für die Validierungen in der VDI 6020 (2001)

als Kompromiss zwischen Glück (1982) und Recknagel (2009) für dieses Beispiel.

### Berechnungen

Die Berechnungen mit unterschiedlichen Rasterabständen ergeben nur Werte zu Temperaturasymmetrien an diskreten Stellen. Zur besseren Darstellung wurden die Werte zwischen den Punkten für die Visualisierung mit Hilfe der VTK-Bibliotheken<sup>2</sup> interpoliert und auf einem triangulierten Gitter farblich dargestellt.

Aus Übersichtsgründen werden hier nur Ergebnisse der Strahlungsasymmetriedifferenz zwischen Boden und Decke für 12 Uhr mittags am 11. August dargestellt. Bei den in Abb. 4a–c gezeigten Ergebnissen handelt es sich um jeweils unterschiedliche Diskretisierungen.

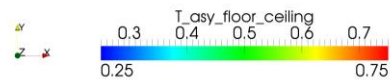
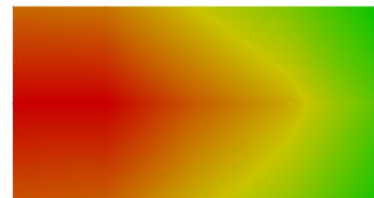


Abbildung 4a: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 12 Uhr mittags am 11. August mit der Diskretisierung  $5 \times 3$ .

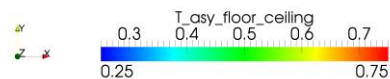
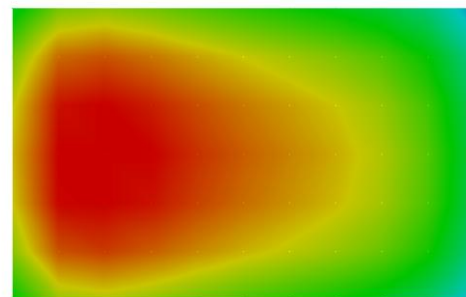


Abbildung 4b: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 12 Uhr mittags am 11. August mit der Diskretisierung  $11 \times 7$ .

<sup>2</sup> VTK - The Visualization Toolkit - [www.vtk.org](http://www.vtk.org)

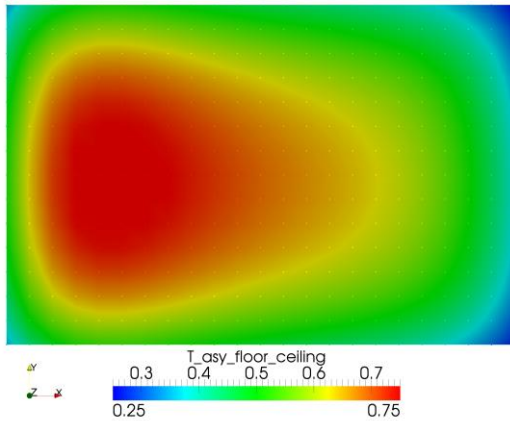


Abbildung 4c: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 12 Uhr mittags am 11. August mit der Diskretisierung 23 x 15.

Für drei unterschiedliche Diskretisierungen in Abb. 4a–c wurde jeweils mit einem fiktiven Radius (siehe Abschnitt zu den Konvergenzstudien) des geometrischen Testobjektes vom 10 cm die Strahlungstemperaturasymmetrie zwischen Decke und Boden berechnet. Für alle drei Bilder sind die Farbskalen (von 0,25 bis 0,75 °C) und die geometrische Skalierung identisch. Die unterschiedliche Größe des dargestellten Gebietes liegt an der gewählten Art der Visualisierung an sich. Der Raum wird prinzipiell in  $a_x+1$  und  $a_y+1$  Bereiche unterteilt. Da allerdings an den Rändern die Berechnung der Sichtbarkeitsfaktoren erhebliche Schwierigkeiten bereitet, wurden nur innere Werte berechnet. Bei der gewählten Diskretisierung sind die Punkte allerdings deckungsgleich; es werden lediglich zusätzliche innere Punkte ausgewertet. Aus Abb. 4 ist zu erkennen, dass, um ein gutes Gesamtbild der Verteilung der Strahlungsasymmetrie zu bekommen, einige Auswertungspunkte nötig sind. Die Berechnungs- und Simulationszeit hängt allerdings ebenfalls stark von der Anzahl der gewählten Auswertungspunkte ab.

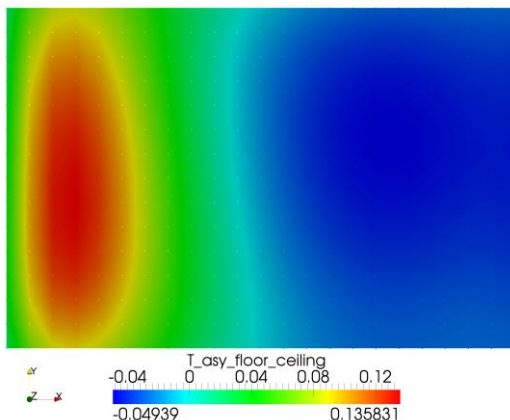


Abbildung 5a: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 8 Uhr vormittags am 11. August mit der Diskretisierung 23 x 15.

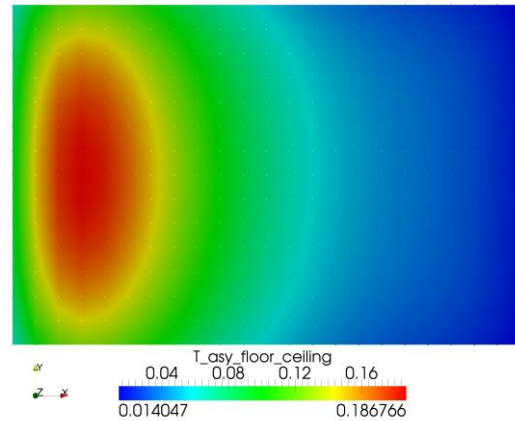


Abbildung 5b: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 20 Uhr abends am 11. August mit der Diskretisierung 23 x 15.

Prinzipiell werden für einen guten Raumüberblick viele Auswertepunkte benötigt; für einen bestimmten Punkt reicht es aber aus, nur diesen zu berechnen.

Abb. 5a–b zeigt für die gleiche Diskretisierung die Strahlungstemperaturasymmetrie zwischen Boden und Decke um 8 Uhr vormittags (a) und um 20 Uhr abends (b). Hierbei ist auf unterschiedliche Farbskalen für die Temperaturverteilung zu achten, die aus Übersichtlichkeitsgründen in beiden Bildern unterschiedlich zu Abb. 4c gewählt worden sind.

### Konvergenzstudien

Betrachtet man nun einen Punkt im VDI Testraum, und berechnet die Strahlungsasymmetrie zwischen Boden und Decke mit unterschiedlichen Größen des geometrischen Testobjektes, so ist zu beobachten, dass unterschiedliche Größen des geometrischen Testobjektes zu unterschiedlichen Temperaturdifferenzen führen. Dies ist vor allem durch die Berechnung der Sichtbarkeitsfaktoren zu erklären. Um den Einfluss sowie die Sensitivität dieses Faktors abzuschätzen wurden Konvergenzstudien des Parameters  $r$  der Testobjektgröße zu der Temperatur an drei definierten Stellen im Raum durchgeführt. Der in Abb. 6 benannte Punkt 0 befindet sich nahe am Fenster, Punkt 7 befindet sich in Raummitte und Punkt 14 befindet sich diagonal zu Punkt 0 sehr weit hinten im Raum (siehe ebenfalls Abb. 3). Als Testzeitpunkt wurde 8 Uhr morgens des 11. Augusts im Testreferenzjahr gewählt. Alle anderen Parameter entsprechen den gleichen Einstellungen wie im vorherigen Punkt genannt.

Aus den Auswertungen der Berechnung, die in Abb. 6 dargestellt sind, ist zu erkennen, dass der fiktive Radius des geometrischen Testobjektes eine große Rolle spielen kann, vor allem in Bereichen, in denen direkte Strahlung vorhanden ist, also nahe dem Fenster. Der fiktive Radius wird in diesem Falle ausgehend vom Mittelpunkt des Achtecks zu allen Ecken hin bemessen.

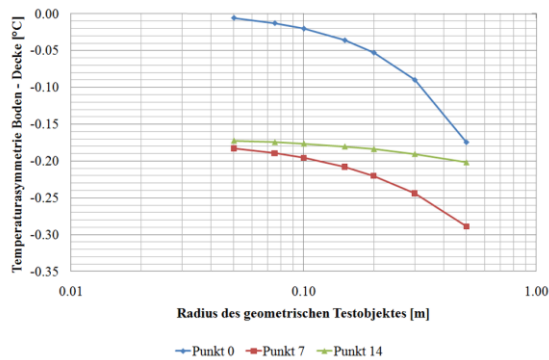


Abbildung 6: Konvergenzverhalten bei unterschiedlichem Radius des geometrischen Testobjektes zur Berechnung der Strahlungstemperatursymmetrie zwischen Boden und Decke an drei ausgewählten Punkten.

Es ist zu erkennen, dass vor allem im Fensterbereich ein Radius vom 10 cm nicht überschritten werden sollte. Andererseits sollte der Radius auch nicht zu klein gewählt werden, da es ansonsten zu Problemen mit der Berechnung der Sichtbarkeitsfaktoren kommen kann, falls der Unterschied in der Größe der Wandflächen zu den Flächen des Testobjektes zu groß gewählt wird.

Da der Raum mit 3,5 m auf 5,0 m dimensioniert ist, suggeriert dieses Konvergenzbeispiel den fiktiven Radius des geometrischen Testobjektes nicht über 3% der kleinsten Raumausdehnung zu wählen. Hier wären allerdings noch detailliertere Studien bezüglich Konvergenzverhalten mit unterschiedlichen Raumgeometrien erforderlich. Es wird daher an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass, falls dieses Verfahren eingesetzt wird, ein spezielles Augenmerk auf die Wahl der Größe des geometrischen Testobjektes gelegt werden sollte.

## ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde eine Methode vorgestellt, um die Strahlungstemperatursymmetrien simulationstechnisch zu erfassen und zu berechnen. Die Ergebnisse können anschließend anhand der EN ISO 7730 bewertet werden und liefern ein objektives Maß, um den thermischen Komfort bezüglich des Faktors der lokalen thermischen Strahlungssymmetrie zu bewerten. Die Berechnung kann unabhängig vom Simulationsprogramm durchgeführt werden, so lange alle benötigten Oberflächentemperaturen zur Verfügung gestellt werden können. Weiterhin sollten weitergehende Untersuchungen bezüglich Wahl der Größe des Testobjektes angestellt werden, um unterschiedlichen Raumgeometrien zu testen und zu bewerten.

## REFERENZEN

- Clarke, J. (2001). Energy simulation in building design, Butterworth-Heinemann.
- EN ISO 7730 (2005). Ergonomie des Umgebungs-klimas – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Beuth Verlag.
- EN ISO 13731 (2001). Ergonomie des Umgebungs-klimas – Begriffe und Symbole. Beuth Verlag.
- Glück, B. (1982). Strahlungsheizung – Theorie und Praxis, Müller Verlag Karlsruhe.
- Modest, M.F. (2003). Radiative Heat Transfer. Academic Press, USA, 2nd edition.
- Recknagel, H. (2009). Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenburg Industrieverlag München.
- van Treeck, C., Frisch, J., Egger, M., and Rank, E. (2009a) Model-adaptive analysis of indoor thermal comfort. In Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland.
- van Treeck, C., Frisch J., Pfaffinger, M., Rank, E., Paulke, S., Schweinfurth, I., Schwab, R., Hellwig, R., Holm A. (2009b). Integrated thermal comfort analysis using a parametric manikin model for interactive real-time simulation, Journal for Building Performance Simulation, Volume 2, Issue 4, Pages 233 – 250, Taylor and Francis.
- van Treeck, C. (2010). Introduction to Building Performance Simulation, Habilitation Thesis, Technische Universität München.
- VDI 6020 (2001). Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation – Teil 1 – Gebäudesimulation, Beuth Verlag.
- Walton, G.N. (2002). Calculation of obstructed view factors by adaptive integration. NISTIR 6925, National Institute of Standards and Technology (NIST)