

Messung des konvektiven Wärmeübergangs – Entwicklung eines neuen Sensors und bauphysikalische Anwendungen

Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis zum 80. Geburtstag gewidmet

Die Erfassung konvektiver Wärmeströme von einem Fluid (z. B. Luft) in angrenzende Oberflächen und umgekehrt, ist oft Gegenstand angewandter Forschung, auch in der Bauphysik: z. B. bei der Berechnung der Energiebilanz von Gebäuden, der Wirkung von Heizflächen, der Untersuchung von Zugluft. Ein konvektiver Wärmestrom ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Fluid und der angrenzenden Oberfläche sowie dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c . Da h_c von der Luftbewegung an der Oberfläche bestimmt wird, diese aber meist örtlich und zeitlich variiert, also schwer zu messen ist, werden oft Rechenmodelle zur numerischen Strömungssimulation eingesetzt: Computational Fluid Dynamics, CFD. Hierbei werden die sog. Navier-Stokes-Gleichungen numerisch gelöst. Anschließend werden die h_c -Werte im Post-Processing errechnet. Dies geschieht ebenfalls nur näherungsweise, da diese Gleichungen nicht exakt gelöst werden können. Eine Alternative zu dieser mathematischen h_c -Bestimmung stellt die Messung von h_c mit dem hier vorgestellten im Fraunhofer IBP neu entwickelten Convective Heattransfer Meter, CHM dar. Dieses Gerät misst hier die neu definierte Temperaturgrenzschichtdicke d an der angeströmten Oberfläche und ermittelt h_c über die Beziehung $h_c = \lambda/d$, mit λ , dem Wärmeleitkoeffizienten des Fluids. Sowohl in einem Versuchsraum als auch im Freiland wurden bauphysikalische Einsatzmöglichkeiten des CHMs nachgewiesen.

Beide o.g. Methoden zur Ermittlung von konvektiven Wärmeströmen ergänzen einander insofern, als in Zukunft CHM-Sensoren zur Validierung von CFD-Berechnungen eingesetzt werden können. Z.B. können mithilfe von lokal durchgeführten physikalischen CHM-Messungen an einer Wand „globale“ CFD-Näherungen für die gesamte Wand angepasst werden.

Stichworte: konvektiver Wärmeübergangskoeffizient; Convective Heattransfer Meter; Temperaturgrenzschichtdicke; CFD-Validierung

1 Einführung

Für die Erfassung konvektiver Wärmeströme von einem Fluid (z. B. Luft) in angrenzende Oberflächen – und umgekehrt – ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient (h_c) eine maßgebende Größe. Zur Ermittlung des h_c -Wertes werden die Strömungsverhältnisse an den Oberflächen meist rechnerisch mithilfe numerischer Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) ermittelt, da exakte Messungen dieser meist räumlich und zeitlich wechselnden

Measuring the convective heat transfer – development of a new sensor and some applications in the field of building physics

Recording convective heat fluxes from some fluid (e.g. air) into any surface- and vice versa- often is a task in applied research. This holds too for building physics, e.g. computing the energy balance of buildings, the effectivity of heating surfaces, the physical cause for unwanted local cooling (draught). The convective heat flux is the product of the difference of temperatures between the fluid and the adjacent surface and the convective heat transfer coefficient h_c . The air movement close to the surface determines h_c . But the accurate measurement of velocities and directions of the currents is nearly impossible because of its spacial and temporal fluctuations. Therefore flow conditions at surfaces often are only calculated by Computational Fluid Dynamics (CFD). Here the Navier-Stokes -equations are solved numerically. Subsequently the h_c -values are calculated by Post-Processing, but also only approximately because these equations cannot be solved exactly. An alternative to the mathematical determination of h_c is its measurement, using the here presented new Convective Heattransfer Meter (CHM), developed at Fraunhofer IBP. Its principle is to measure the here newly defined thickness of the temperature boundary layer d close to the surface. And h_c follows from $h_c = \lambda/d$, λ the thermal conductivity coefficient of the fluid.

Two successful applications of the CHM in the field of building physics are presented: one indoor and one outdoor experiment. Both a.m. methods to record the convective heatflux complement one another because CHMs can be used to validate CFD-calculations in future. E.g. local CHM-measurements on a wall area can be used to fit global CFD- approximation results for the whole wall.

Keywords: convective heat transfer coefficient; convective heat transfer meter; temperature boundary layer thickness; CFD validation

Fluidströmungen, mit Angabe deren Richtung und Betrag, kaum möglich sind. Anschließend werden die h_c -Werte unter Nutzung der Navier-Stokes-Gleichungen errechnet. Dies geschieht ebenfalls nur näherungsweise, da diese Gleichungen nur numerisch, nicht exakt, gelöst werden können. Zudem ist die Wirkung der Geometrie des angeströmten Körpers auf h_c rechnerisch schwer zu erfassen. Einen Ausweg aus diesen grundsätzlichen Schwierigkeiten bietet die Messung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten mit dem im Fraunhofer IBP neuentwickelten Convective

Heattransfer Meter (CHM). Das im Folgenden für das Fluid Luft vorgestellte Messverfahren beruht auf der Messung des logarithmischen Temperaturgradienten innerhalb der thermischen Grenzschicht einer angeströmten Oberfläche, mithilfe von Thermoelementen. Dabei wird der Begriff „Temperaturgrenzschichtdicke“ neu definiert. Zwei bauphysikalische Anwendungen des CHM in der Praxis werden abschließend präsentiert.

2 Das Convective Heattransfer Meter (CHM)

2.1 Physikalischer Hintergrund

Der konvektive Wärmeaustausch eines Körpers mit der Oberflächentemperatur ϑ_{sf} und der Lufttemperatur außerhalb der Grenzschicht ϑ_a erfolgt nach der Gleichung:

$$q_c = h_c \cdot (\vartheta_{sf} - \vartheta_a) \quad (1)$$

mit q_c , der konvektiven Wärmestromdichte und h_c , dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Beträgt der Abstand x senkrecht zur Oberfläche des Körpers 0 mm (Grenzschichtbedingung der Prandtlscheln Grenzschichttheorie), ruht die Luft und es gilt:

$$q_c = \lambda \cdot (d\vartheta/dx)_{x=0} \quad (2)$$

mit dem Wärmeleitkoeffizienten der Luft λ und der Lufttemperatur ϑ .

Setzt man Gl. (1) und Gl. (2) gleich, ergibt dies die Differenzialgleichung (DGL):

$$h_c \cdot (\vartheta_{sf} - \vartheta_a) = \lambda \cdot (d\vartheta/dx)_{x=0} \quad (3)$$

Unter Berücksichtigung der beiden Randbedingungen

$$\vartheta_{x=0} = \vartheta_{sf} \quad \text{und} \quad \vartheta_{x=\infty} = \vartheta_a$$

haben Lösungen der DGL die Form:

$$\vartheta_x - \vartheta_a = (\vartheta_{sf} - \vartheta_a) \cdot e^{-x/d} \quad (4)$$

mit der Eulerschen Zahl $e = 2,72$ (gerundet).

Eingeführt wurde in Gl. (4) die Temperaturgrenzschichtdicke „ d “. Sie ist jener Abstand $x = d$, bei dem die maximale Temperaturdifferenz $\vartheta_{sf} - \vartheta_a$ abgefallen ist auf:

$$\vartheta_d - \vartheta_a = (\vartheta_{sf} - \vartheta_a) \cdot e^{-d/d} = (\vartheta_{sf} - \vartheta_a)/e \quad (5)$$

Diese Definition der Grenzschichtdicke unterscheidet sich von der üblicherweise mit „ δ “ bezeichneten Definition, die den Abstand $x = \delta$ kennzeichnet, bei dem die maximale Differenz abgefallen ist auf:

$$\vartheta_\delta - \vartheta_a = (\vartheta_{sf} - \vartheta_a)/99, \text{ also den } 1\% \text{-Wert der gesamten Temperaturdifferenz.}$$

Experimentell wurde Gl. (4) durch praktisch störungsfreie Messungen des Lufttemperaturgradienten in der Nähe eines beheizten künstlichen Kopfes, bei unterschiedlicher Konvektion, bestätigt [1]. Hierfür wurde am Fraunhofer IBP ein Laser-Differenzial-Interferometer (LDI) eingesetzt. Bild 1 zeigt den Messaufbau.

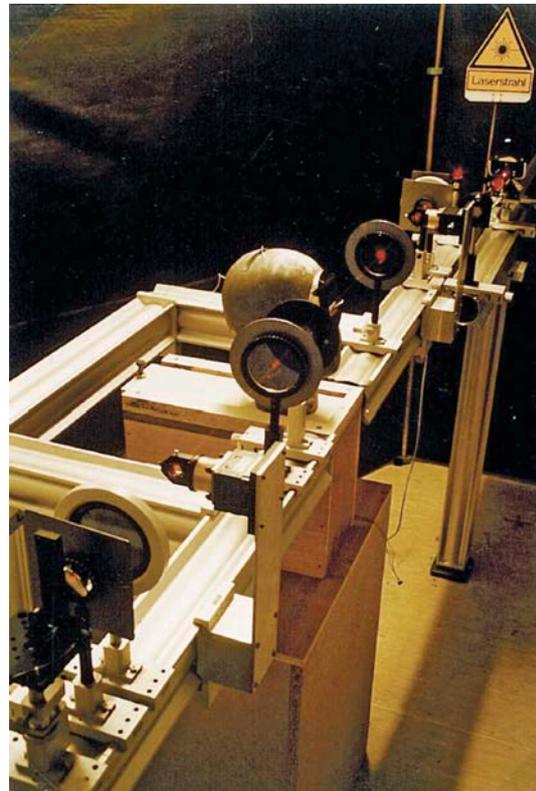


Bild 1. Messaufbau der LDI-Messung an einem beheizten künstlichen Kopf [1].

Fig. 1. Test setup of LDI measurement on a heated artificial head [1].

Die Ergebnisse sind in Bild 2 dargestellt. In Abhängigkeit vom Abstand x vom künstlichen Kopf, der auf 34°C beheizt war, ist die Temperaturdifferenz $\vartheta_x - \vartheta_a$ im logarithmischen Maßstab (Ordinate) aufgetragen. Die Lufttemperatur außerhalb der Grenzschicht betrug $\vartheta_a = 22^\circ\text{C}$. Eingetragen sind die Messwerte für den Fall der ruhenden Luft (Eigenkonvektion) sowie für drei Luftgeschwindigkeiten mit jeweils unterschiedlicher Standardabweichung.

Der in Bild 2 erkennbare exponentielle Abfall der Lufttemperatur in unmittelbarer Nähe des Konvektionskörpers bestätigt experimentell die in Gl. (4) wiedergegebene Lösung der DGL, Gl. (3).

Das Ergebnis beschreibt die konvektive Wärmeabgabe an der Grenzschicht mit einer Exponentialfunktion, die somit als ein dissipativer Prozess anzusehen ist, bei dem mechanische Energie (hier Strömungsenergie) in Wärmeenergie umgewandelt wird.

Eigentliches Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c . Hierzu wird Gl. (4) in die Gl. (3) eingesetzt:

$$h_c \cdot (\vartheta_{sf} - \vartheta_a) = \lambda \cdot [(\vartheta_{sf} - \vartheta_a) \cdot e^{-0/d} \cdot (-1/d)] \text{ oder:}$$

$$h_c = -\lambda/d \quad (6)$$

Das Vorzeichen in Gl. (6) wird von der Richtung des konvektiven Wärmestroms bestimmt. Bei bekanntem (gemessenem) Verlauf von $\vartheta_x - \vartheta_a$ in Abhängigkeit von x ist d aus Gl. (4) zu ermitteln und daraus dann h_c . In Bild 2 ergibt sich z. B. für ruhende Luft: $\vartheta_d - \vartheta_a = (\vartheta_{sf} - \vartheta_a)/2,72 = 4,4 \text{ K}$

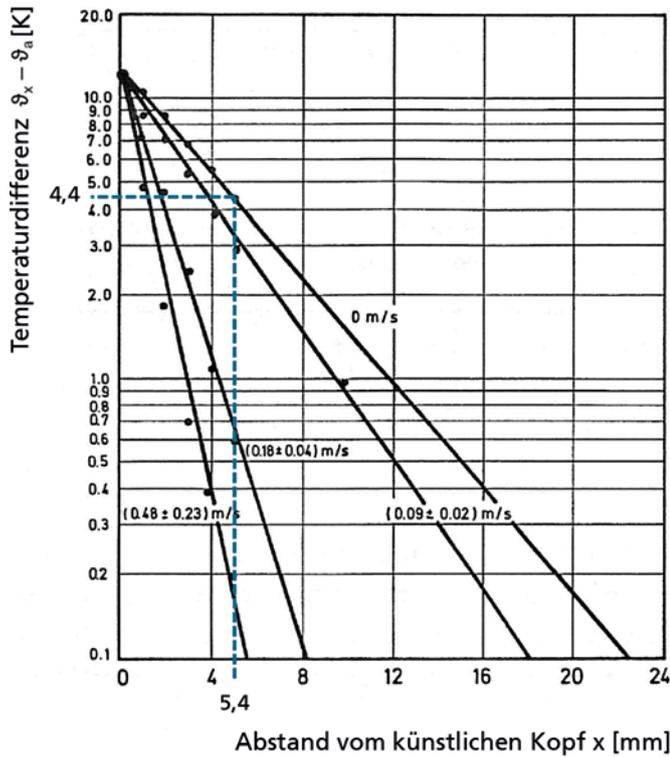


Bild 2. Lufttemperatur ϑ_x in Abhängigkeit vom Abstand x vom künstlichen Kopf (34°C) abzüglich der Lufttemperatur ϑ_a im Messraum (22°C), gemessen bei vier unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Standardabweichungen – in einfach logarithmischer Darstellung, Originaldaten aus [1]. Die Verbindung der Messpunkte durch Geraden lassen auf einen exponentiellen Abfall schließen.
 Fig. 2. Air temperature ϑ_x as a function of the distance x from the artificial head (34°C) minus the air temperature ϑ_a in the room (22°C), at four different mean air velocities and different standard deviations, original measurement data from [1]. Presentation of the data in a logarithmic scale. The straight lines offer an exponential correlation.

Gl. (5) und folglich $d = 5,4$ mm (die verallgemeinerte mathematische Berechnung von d wird in Abschnitt 2.2.1 vorgestellt). Dementsprechend beträgt der konvektive Wärmeübergangskoeffizient nach Gl. (6): $h_c = (0,026\text{W/mK})/5,4\text{ mm} = 4,8\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten ist d entsprechend kleiner und damit h_c größer.

Eine Vorstellung von der Dicke der Temperaturgrenzschicht in Abhängigkeit von der Höhe des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten nach Gl. (6) zeigt Bild 3.

2.2 Beschreibung des Convective Heattransfer Meters

In der Regel ist der in Bild 1 wiedergegebene Messaufbau zur Ermittlung von h_c zu aufwändig. Aus diesem Grund wurde am Fraunhofer IBP eine für die Praxis geeignete Messeinrichtung entwickelt: das Convective Heattransfer Meter (CHM).

2.2.1 Messtechnischer Hintergrund

In diesem Abschnitt wird das Messprinzip des neu entwickelten CHM vorgestellt. Nach Gl. (6): $h_c = \lambda/d$ muss die Temperaturgrenzschichtdicke d gemessen werden, um da-

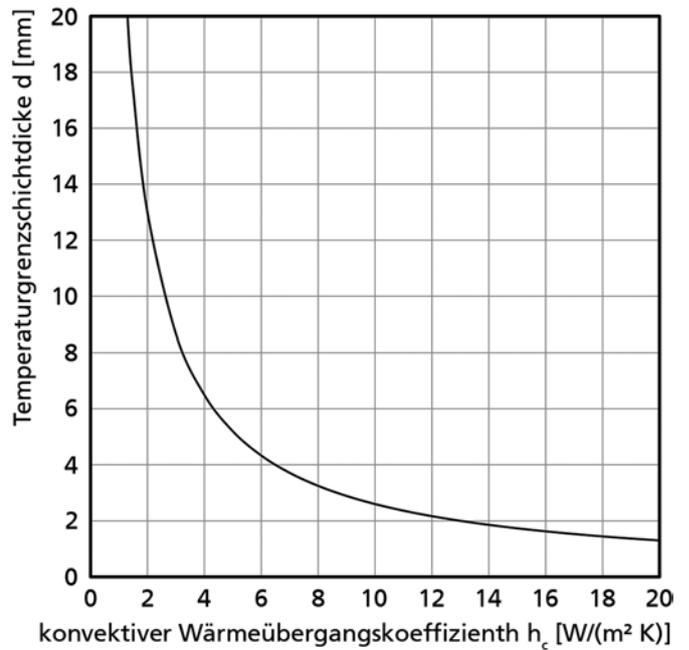


Bild 3. Temperaturgrenzschichtdicke d in Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c , errechnet aus Gl. (6): $h_c = \lambda/d$.

Fig. 3. Temperature boundary layer thickness d as a function of the convective heat transfer coefficient h_c , from equ. (6): $h_c = \lambda/d$.

raus dann h_c errechnen zu können. Dazu wird Gl. (4) durch Logarithmieren wie folgt umgeformt:

$$\ln(\vartheta_x - \vartheta_a) = \ln(\vartheta_{sf} - \vartheta_a) - x/d \quad (7)$$

und nach d aufgelöst:

$$d = x / [\ln(\vartheta_{sf} - \vartheta_a) - \ln(\vartheta_x - \vartheta_a)] \quad (8)$$

Um d zu ermitteln, sind also folgende Größen zu messen:

1. x , der Abstand der Lufttemperatur-Messstelle von der Konvektionsoberfläche,
2. $\vartheta_{sf} - \vartheta_a$, die Differenz der Temperaturen an der Oberfläche und der Luft außerhalb der Grenzschicht,
3. $\vartheta_x - \vartheta_a$, die Differenz der Lufttemperaturen im Abstand x und außerhalb der Grenzschicht.

Die gesuchte Größe ergibt sich dann aus Gl. (6) mit Gl. (8):

$$h_c = \lambda \cdot [\ln(\vartheta_{sf} - \vartheta_a) - \ln(\vartheta_x - \vartheta_a)]/x \quad (9)$$

Der Wärmeleitkoeffizient der Luft wird angenommen mit $\lambda = 0,026\text{ W/mK}$ und ist in Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur oder Luftdruck zu korrigieren.

2.2.2 Technische Ausführung des CHM

Zur Ermittlung der Temperaturdifferenzen $\vartheta_{sf} - \vartheta_a$ und $\vartheta_x - \vartheta_a$ werden Thermoelemente (hier Kupfer-Konstantan-Thermoelemente) eingesetzt. Diese liefern bei einer Temperaturdifferenz von 23 K eine Thermospannung von 1 mV. Dementsprechend bedeutet eine Thermospannung von 1 μV eine Temperaturdifferenz von 0,023 K. Die

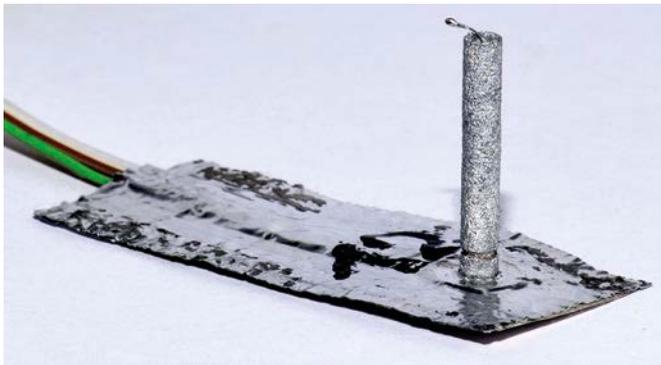


Bild 4. Foto des CHM-Sensors.
Fig. 4. Photo of the CHM sensor.

Messempfindlichkeit gängiger Messgeräte liegt in diesem Bereich. In Verbindung mit Bild 2 kann damit die Messgenauigkeit des CHM, bzw. eine notwendige minimale Temperaturdifferenz zwischen der Konvektionsoberfläche und der Luft abgeschätzt werden. Bild 4 zeigt eine Fotografie des CHM-Sensors und Bild 5 gibt diesen als Grafik wieder, mit Angabe der jeweiligen Lage der Thermoelement-Lötstellen.

Der Abstand x der Thermoelement-Lötstelle ϑ_x beträgt ca. 2 mm und muss für jeden Sensor durch Kalibrierung genau ermittelt werden. Die Lötstelle zur Messung der Lufttemperatur ϑ_a außerhalb der Grenzschicht befindet sich ca. 20 mm oberhalb der Lötstelle zur Messung der Oberflächentemperatur ϑ_{sf} . Entsprechend der Kurve der Temperaturgrenschichtdicke in Abhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (Bild 3) ist dieser Abstand ausreichend groß, da bei einem zu erwar-

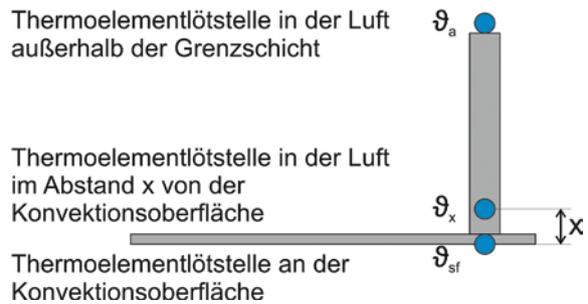


Bild 5. Grafische Darstellung der Thermoelement-Lötstellen des CHM-Sensors.
Fig. 5. Graph of the thermocouple solder joints of the CHM sensor.

tenden minimalem h_c -Wert von ca. $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (ruhende Luft, Eigenkonvektion) die Temperaturgrenschichtdicke d nur ca. 5 mm beträgt. Bei größerer Konvektion ist d noch kleiner.

Außer dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c liefert das CHM durch Nutzung von Gl. (1) auch die konvektive Wärmestromdichte $q_c = h_c \cdot (\vartheta_{sf} - \vartheta_a)$.

2.3 Messungen mit dem CHM bei Eigenkonvektion und in einem Windkanal

Erste Messungen mit dem CHM erfolgten an einer Aluminiumplatte (Abmessungen: $100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$), die durch eine Heizfolie an der Rückseite erhitzt wurde. Der CHM-Sensor wurde auf der Vorderseite montiert. Zur Ermittlung der Eigenkonvektion wurde die Platte senkrecht in einem Raum mit ruhender Luft aufgestellt. Die Ergeb-

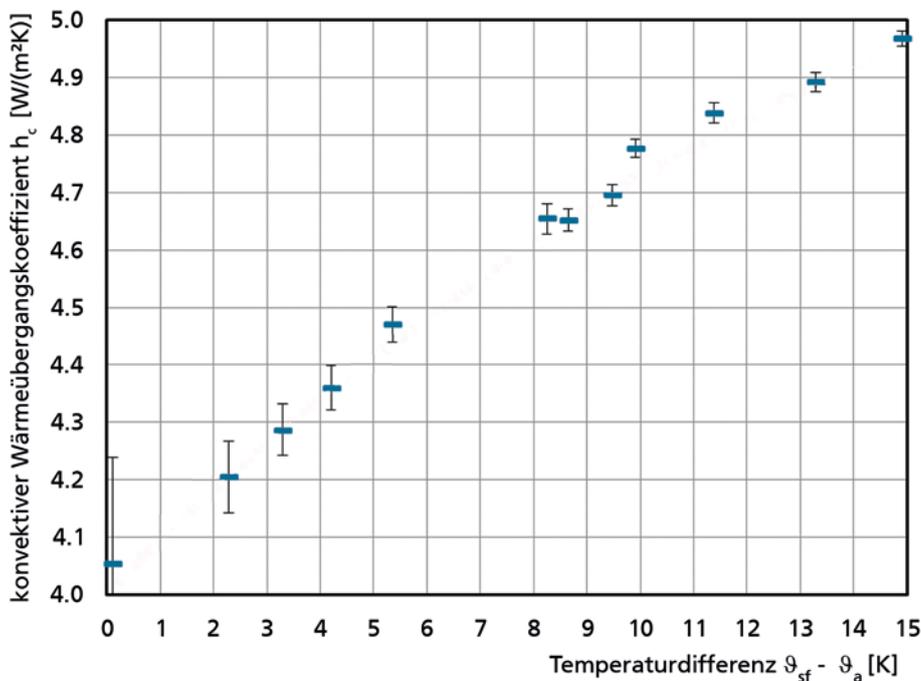


Bild 6. Mit dem CHM gemessene h_c -Werte an einer senkrechten, beheizten Platte bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen $\vartheta_{sf} - \vartheta_a$. (Jeder Datenpunkt entspricht dem Mittelwert einer Messperiode von 5 Minuten mit einer Abtastrate von 10 Sekunden).
Fig. 6. h_c -values, measured by a CHM, mounted on a vertical heated board at different temperature differences between the board surface ϑ_{sf} and the air ϑ_a . (each data point represents the average of a 5 minute measurement period with a sampling rate of 10 seconds).

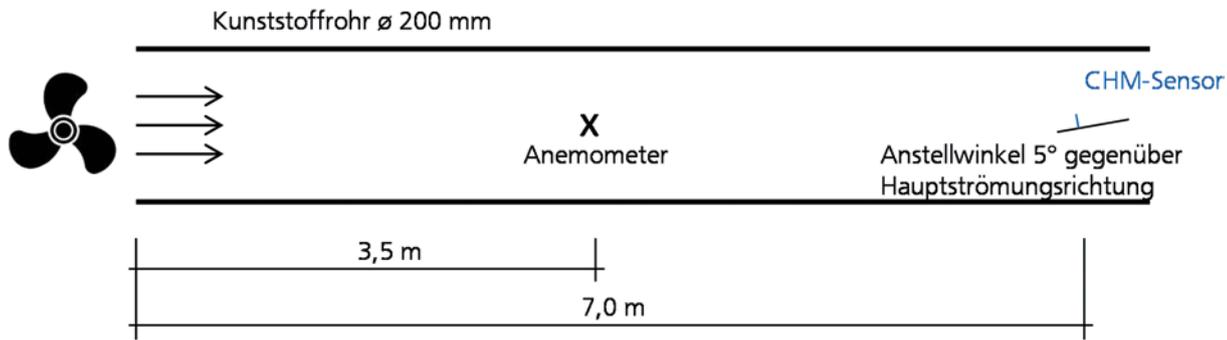


Bild 7. Messaufbau für h_c -Messungen mit dem CHM in einem Windkanal des Fraunhofer IBP. Die Kanalabmessungen erlauben bei den vorgelegenen Luftgeschwindigkeiten eine turbulente Rohrströmung mit „rechteckigem“ Strömungsprofil.
Fig. 7. Test setup of a wind tunnel of Fraunhofer IBP to measure h_c by a CHM. The size of the tunnel allows a turbulent pipe flow (“rectangular” profile of airvelocity).

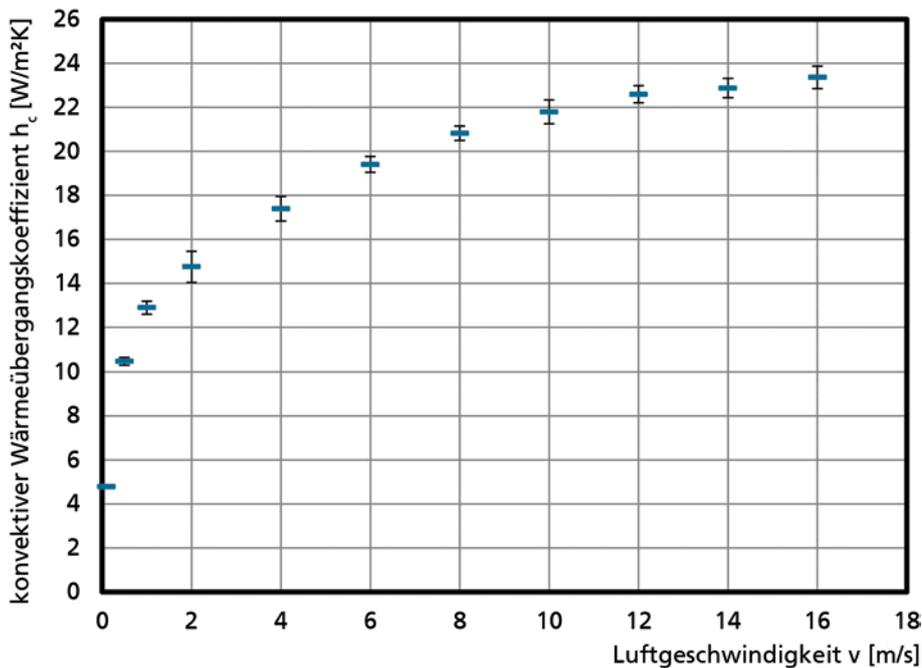


Bild 8. Im Windkanal (Bild 7) mit dem CHM-Sensor gemessene h_c -Werte in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit. (Jeder Datenpunkt entspricht dem Mittelwert einer Messperiode von 5 Minuten mit einer Abtastrate von 10 Sekunden).
Fig. 8. h_c -values, measured by a CHM in the wind tunnel (Fig.8) at different air velocities. (every data point represents the average of a 5 minute measurement period with a sampling rate of 10 seconds).

nisse der h_c - Messungen in Abhängigkeit von der Differenz der Temperaturen zwischen der Oberfläche der Platte und der Raumluft ($\vartheta_{sf} - \vartheta_a$) gibt Bild 6 wieder.

Der Wert für die Eigenkonvektion wird durch die aufgrund des thermischen Auftriebs in Plattennähe strömende Luft sowie die Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung über die ruhende Luftschicht vor der Platte bestimmt. Der Maximalwert für Eigenkonvektion betrug im vorliegenden Fall ca. $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Bei $(\vartheta_{sf} - \vartheta_a) = 0 \text{ K}$ entfällt die eigentliche Eigenkonvektion und der h_c -Wert, der sich aufgrund der Wärmeleitung der Luft ergibt, beträgt $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Für Messungen bei bewegter Luft (Zwangskonvektion) wurde die Aluminiumplatte mit dem CHM-Sensor in einen Windkanal eingebracht, wobei der Anstellwinkel 5 Grad (um sicher im Luv-Bereich zu messen) betrug. Den Messaufbau dazu zeigt Bild 7.

Die in Bild 8 wiedergegebenen Ergebnisse erster Messungen folgen etwa einer Quadratwurzelfunktion, im Einklang mit in der Literatur zu findenden Formeln.

3 Anwendung des CHM in einem Raum

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Energieeffizienz durch Innendämmsysteme“ wurden CHM im Klimasimulator des Fraunhofer IBP in Stuttgart eingesetzt. Die Abmessungen des mit Innendämmung und Flächenheizungen ausgestatteten Versuchsraums betragen $4,38 \text{ m} \times 3,87 \text{ m} \times 2,7 \text{ m}$ ($L \times B \times H$), (Bild 9).

Bei der Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Bauteils im Fensterprüfstand des Fraunhofer IBP wurden zuvor erfolgreich CHM eingesetzt, um die nach Norm einzustellenden Übergangswiderstände auf der Warmseite des Probekörpers zu überwachen, so dass die Voraussetzungen für den Einsatz der Sensoren inner-



Bild 9. Klimasimulator in dem ein Versuchsraum mit Innendämmung und Flächenheizungen aufgebaut wurde, von außen.

Fig. 9. Climate simulator with a test chamber inside to test internal insulation and panel heating from the outside.



Bild 10. Versuchsraum mit CHM und anderen Sensoren.

halb des Forschungsprojekts gegeben waren. Die im Modellraum mit Flächenheizung und Innendämmung durchgeführten Versuche sollten Erkenntnisse über die Temperaturverteilung im Raum und die Verlustwärmeströme über die Wände bei Aufheiz- und Abkühlvorgängen liefern.

Zur Ermittlung des Klimas im Versuchsraum wurden – neben mehr als 100 Temperatur- und Feuchtesensoren sowie Wärmestromplatten – auch 20 CHM an den Innenwandoberflächen angebracht, um den konvektiven Wärmeübergangskoeffizient direkt zu erfassen (Bild 10 und Bild 11). Die Thermospannungen im μV -Bereich der 20 CHM wurden mit einem Scanner der Firma Agilent, Typ 34970A, gemessen. Die Messdaten der zahlreichen Versuche wurden zur Validierung von WUFI[®]-Rechnersimulationen der Wärme- und Feuchteverhältnisse des gesamten Messraums herangezogen. Die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangs mit den CHM ermöglichte dabei eine präzise Simulation der klimatischen Verhältnisse im Raum,



Bild 11. Eine Detailaufnahme mit CHM (rechts) zur Messung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmestrommesser (links) zur Ermittlung der Wärmestromdichte im Versuchsraum.

Fig. 11. A Detail with CHM (on the right side) to measure the convective heat transfer coefficient and heatflux meter (on the left side) to measure the heatflux density in the test chamber.

die bekanntermaßen mit für solche Simulationen üblichen Standardübergangswiderständen nicht möglich gewesen wäre.

4 Anwendung des CHM im Freiland

Die zuverlässige messtechnische Ermittlung von Wärmeübergängen ist nicht nur in Innenräumen von Interesse sondern auch unter in situ-Bedingungen im Freiland. Die Wärmeübergänge haben nicht nur auf Bauteilsysteme mit verhältnismäßig hohen U-Werten einen Einfluss, sondern auch auf alle Komponenten, für welche die Erwärmung aufgrund absorbiertes Solarstrahlung eine Rolle spielt. Der äußere Übergang ist nämlich entscheidend dafür, welcher Anteil der absorbierten Wärme die Komponente wieder (ungenutzt) verlässt. Beispiele für derartige Komponenten sind u. a. Photovoltaik-Paneele, thermische Solarkollektoren oder passive Absorber zur Luftvorwärmung. Um die Einsetzbarkeit des CHM bei freier Bewitterung zu untersuchen, wurde das System am Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand des Fraunhofer IBP in Holzkirchen [3] montiert (Bild 12). Bei der Auswertung von g- und U-Wert-Messungen unter in situ-Bedingungen ist die genaue Kenntnis der während der Messung vorherrschenden Wärmeübergänge von zentraler Bedeutung [4], [5]. Obgleich an dieser Versuchseinrichtung die Messungen nur bei geeigneter Witterung durchgeführt wurden, war die an der Außenseite der Versuchseinrichtung installierte Sensorik permanent dem Klima ausgesetzt, so dass gezeigt werden konnte, dass das CHM diesen Witterungsbedingungen widerstehen kann. Zudem liegen nun für zahlreiche Messtage aufgezeichnete Werte des CHM und der entsprechenden Witterung vor.

Als Anhaltspunkt, welche äußeren konvektiven Wärmeübergänge zu erwarten sind, wird DIN EN ISO 6949 herangezogen. Hier werden für übliche Windgeschwindig-



Bild 12. Foto des Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstands des Fraunhofer IBP mit Detailausschnitt des außen installierten CHM.

Fig. 12. Photo of the Fraunhofer IBP-calorimetric façade and roof test facility (on the left side) and the „outdoor mounted“ CHM (on the right side).

keiten von 0 bis 4 m/s konvektive Wärmeübergänge von 4 bis 20 W/(m²K) angesetzt. Zur Messung seines g-Werts wird ein zu untersuchender Prüfling (in Bild 12 ein ETFE-Membrankissen-Element) in die entsprechende Öffnung des Prüfstands eingebaut. Während des in Bild 13 dargestellten Zeitraums wurde die Oberfläche des untersuchten Elementes zusammen mit dem CHM der Sonne heliosta-

tisch nachgeführt. Die Grafik zeigt während der Nacht von 0 bis 6 Uhr relativ homogene Randbedingungen mit einer Luftgeschwindigkeit von etwa 1 m/s an der Oberfläche. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient betrug in diesem Zeitraum etwa 7 W/(m²K). Im Zeitraum von 7 bis 9 Uhr war der Sensor bei gleichbleibender Luftgeschwindigkeit zusätzlich der Solarstrahlung ausgesetzt. Vergleicht man die in dieser Periode gemessenen Wärmeübergänge mit jenen, die ohne Solarstrahlung gemessen wurden, kann keine unerwünschte systematische Beeinflussung des Messwertes durch die Bestrahlung festgestellt werden. Ab 9 Uhr stieg die Luftgeschwindigkeit auf bis zu 2,8 m/s an, um anschließend wieder abzufallen. Hier kann erwartungsgemäß eine direkt proportionale Veränderung des h_c -Wertes mit einem Maximalwert von über 11 W/(m²K) beobachtet werden. Im Zeitraum zwischen 16 bis 20 Uhr fiel die Solarstrahlungsintensität auf das Messsystem wieder auf Null ab. Auch hier bleibt der Zusammenhang zwischen konvektivem Wärmeübergang und Luftgeschwindigkeit erhalten, ohne von der Veränderung der Strahlungsintensität beeinflusst zu werden. Ab 21 Uhr fand ein starkes Niederschlagsereignis statt, das den Messwert deutlich beeinflusste. Hierbei entstand durch die Oberflächenbenetzung des Messsystems ein thermischer Kurzschluss zwischen dem Temperaturmesspunkt an der Oberfläche und jenem auf der Höhe x. Durch diese Störung der Temperaturdifferenzmessung könnten die Messdaten nicht mehr verwendet werden.

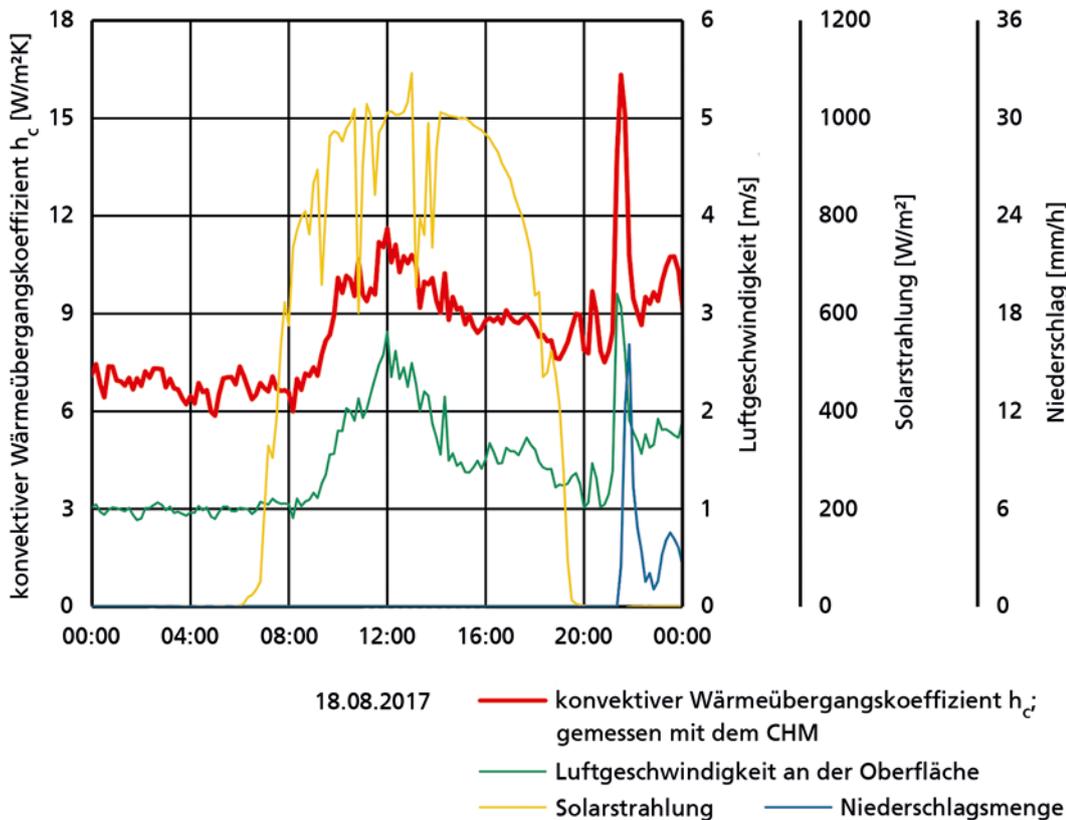


Bild 13. Beispielhafte Verläufe des mit dem CHM gemessenen äußeren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c (rote Linie) und der Außenklimabedingungen am 18.08.2017. Der mit dem CHM-Sensor versehene Prüfling wurde am Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand des Fraunhofer IBP heliostatisch nachgeführt.

Fig. 13. Exemplary profiles of outdoor convective heat transfer coefficients h_c , measured by a CHM (red line), solar radiation (yellow line) and rainfall (blue line), on 18. August 2017. The test object together with the mounted CHM was always oriented to the sun, controlled by the Fraunhofer IBP-calorimetric façade and roof test facility

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Veränderungen in der oberflächennahen Luftgeschwindigkeit durch den CHM im erwarteten Maß als proportionale Veränderung des konvektiven Wärmeübergangs wiedergegeben werden. Das Messsystem erwies sich im vorliegenden Versuch als unabhängig von solarer Bestrahlung. Daraus kann geschlossen werden, dass es keine unerwünschte Abhängigkeit von einem zusätzlich erwärmten Untergrund gibt. Somit kann das Messsystem auch auf einem beheizten Unterbau angebracht werden, um z. B. Vereisungen und Reifbildung unter winterlichen Bedingungen zu vermeiden. Ansonsten sollten die CHM-Messwerte bei Niederschlag (Regen, Eisbildung) jedoch nicht verwendet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Convective Heattransfer Meter (CHM) wurde hier ein Messverfahren vorgestellt, das aufgrund des nachgewiesenen exponentiellen Temperaturverlaufs der Luft in Grenzschichtnähe die Grenzschichtdicke und damit den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c erfasst. Validierung und Einsatzfähigkeit des neuen Messverfahrens für bauphysikalische Untersuchungen in Räumen und im Freiland wurden überprüft und nachgewiesen.

Eine über die Bauphysik hinausgehende weitere Anwendungsmöglichkeit des CHM-Messprinzips ergibt sich aus der Linearität des Zusammenhangs zwischen h_c -Wert und der Scherkraft der bewegten Luft (Reibung) an dem angeströmten Körper (Grenzschichttheorie). Dadurch könnte mithilfe von CHM, die auf das Rotorblatt eines Windrads montiert sind, die Reibungskraft des Windes erfasst werden. Die Ergebnisse könnten dazu beitragen, den Rotorblatt-Anstellwinkel so einzustellen, dass Schäden am Windrad vermieden, bzw. – bei Einstellen des Winkels bis zur Belastungsgrenze – mehr Strom erzeugt werden könnte.

Literatur

- [1] Mayer, E.: Entwicklung eines Messgerätes zur getrennten und integrativen Erfassung der physikalischen Raumklimakomponenten. Dissertation. Technische Universität München (1983).
- [2] Mayer, E., Visser, M.: Vorrichtung und Verfahren zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Patent-Offenlegungsschrift DE102016107212A1 (2017).
- [3] Kersken, M., Haag, G., Sinnesbichler, H.: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Errichtung einer Versuchseinrichtung für energetische, feuchtetechnische und strahlungsphysikalische Untersuchungen an neuartigen Dachsystemen und transparenten Außenkonstruktionen. Kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand. ESB 003/2012. HOKI.
- [4] Kersken, M., Sinnesbichler, H.: Kalorimetrieverfahren zur in-situ-Messung des solaren Gesamtenergiedurchlassgrads. In: Messtechnik in der Bauphysik (2016), pp. 35-39.
- [5] Kersken, M.: Erarbeitung eines Verfahrens zur klimaunabhängigen Ermittlung der energetischen Kennwerte von transparenten Fassaden- und Membrankonstruktionen aus in situ-Messungen; ISBN: 978-3-8396-1315-3. Stuttgart (Germany): Fraunhofer Verlag, 2018.
- [6] DIN EN ISO 6946:2018-03 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr. Erhard Mayer
Dr. Matthias Kersken
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Standort Holzkirchen
Fraunhofer-Straße 10, 83626 Valley

Andreas Zegowitz
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Institut Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen
Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de