

TEMPERATURFELDBERECHNUNG AUS EINER PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY MESSUNG

Matthias Mitterhofer², Christoph van Treeck^{1,2}

¹Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D), RWTH Aachen University, Aachen

²Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen, Valley
treeck@e3d.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Der Beitrag stellt ein Rechenverfahren vor, mit dem auf Basis einer laseroptischen Messmethode Temperaturfeldinformationen in Fluiden ermittelt werden können. Grundlage für die Lösung der Energietransportgleichung stellen Geschwindigkeitsfelder dar, die mittels stereoskopischer Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen erhalten werden. PIV ist eine laseroptische Messmethode zur Erfassung von Geschwindigkeitsfeldern. Da kein intrusiver Sensor nötig ist, können Strömungen ohne Beeinflussungen vermessen werden. Eine stereoskopische PIV Messung erzeugt Rasterinformationen zu allen drei Geschwindigkeitskomponenten in einer Ebene der Strömung. Die Temperaturverteilung an den Rändern des Messgebiets wird durch punktuelle Messung (Temperaturdioden) und flächenhafte Messung (Infrarotkamera) ermittelt. Anhand der Strömungscharakteristika wird der Energietransport vom Rand aus durch das Messgebiet berechnet. Die Energiegleichung der Navier-Stokes Gleichungen der Strömungsmechanik stellt hierbei die physikalische Grundlage für den Energietransport durch das Fluid dar. Eine Lösung dieser mittels eines numerischen Modells ergibt die Temperaturverteilung im Messgebiet. Das Verfahren wird am Beispiel einer freien instationären Eigenkonvektionsströmung eines Menschen demonstriert. Das Verfahren ist vielversprechend, da zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Temperaturfeldinformationen erhalten werden und in Raumluftströmungen laserinduzierte Fluoreszenzmethoden (LIF) auf Grund gesundheitsbedenklicher Tracergase bzw. toxi-

scher Partikel nicht eingesetzt werden können.

ABSTRACT

The article presents a calculation method for determining fluid flow temperature field data using a laser optical measurement procedure. Basis for solving the energy transport (heat) equation are velocity fields obtained by stereoscopic Particle Image Velocimetry (PIV) measurements. PIV is a laser optical measurement method for quantitatively capturing velocity fields. Since there is no intrusive sensor necessary it allows for undisturbed flow measurements. Stereoscopic PIV measures generate grid data with pixel-wise information of all three components of velocity vectors within a single two-dimensional image layer of the flow. The temperature distribution at the domain boundaries is determined punctually (by temperature diodes) and surface-wise by extensive infrared imaging. Energy transport from the boundaries through the interior of the measurement area is calculated in terms of the inlet flow characteristics. The energy equation of the Navier-Stokes equations defines the fundamentals for the energy transport within the fluid. Its solution using a numerical model results in the temperature distribution of the measurement area. The method is demonstrated by the free convection plume of a human. The procedure is promising since it is possible to get high resolution temperature field data of indoor air flows, as related laser induced fluorescence methods (LIF) are not appropriate indoors as in this case harmful tracers and toxic particles must be used.

HINTERGRUND

Motivation für den vorliegenden Beitrag ist die Untersuchung des Wärmeübergangs wie etwa der Wärmeabgabe des menschlichen Körpers an die umgebende Luft durch konvektive Wärmeübertragung. Für die Berechnung der entsprechenden konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ist es hierbei notwendig, den Temperaturgradienten in Körpennähe zu bestimmen. Dafür muss das sich einstellende Temperaturfeld im Wandbereich bekannt sein.

Messtechniken, wie Anemometer, Temperaturdioden, Globethermometer, Thermographie usw. ermöglichen es nicht, hochaufgelöste Temperaturfeldinformationen in einer Ebene oder einem Volumen einer Strömung zu erhalten. Particle Image Velocimetry (PIV) ist eine vielversprechende laseroptische Messmethode zur Erfassung von Geschwindigkeitsfeldern, mit der Rasterinformationen zu allen drei Geschwindigkeitskomponenten in der Ebene einer Strömung ermittelt werden können. Mittels PIV können jedoch lediglich Informationen bzgl. des Geschwindigkeitsfeldes bestimmt werden.

Darauf aufbauende Methoden der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) bieten zwar die technologischen Voraussetzungen zur Erfassung von Temperaturfeldinformationen (Lozano et al. 1992, Sakakibara & Adrian 2004), sind in Innenräumen jedoch nicht anwendbar bzw. in der Regel auf die Untersuchung von Verbrennungsvorgängen beschränkt. Die hierbei zu verwendenden Tracergase haben häufig kanzerogene Wirkung, sind in anderer Weise als gesundheitsschädlich eingestuft oder besitzen stark färbende Eigenschaften. Ihr Einsatz führt zur Kontamination des Versuchsraums.

Der Beitrag diskutiert eine mögliche Lösung des Problems, indem ein Rechenverfahren vorgestellt wird, mit dem auf Basis einer laseroptischen PIV Messung Temperaturfeldinformationen durch parallel angewendete numerische Simulation berechnet werden.

In Zitzmann et al. (2006) wird mit der sogenannten Freeze Flow Methode ein CFD-basierter Ansatz aufgezeigt, mit dem durch

zeitweises "Einfrieren" der gekoppelten Berechnungsvorschrift zur numerischen Lösung der Impulsgleichungen und Energiegleichung signifikant Rechenzeit eingespart werden kann. Die Idee dieses Konzeptes wird im Folgenden genutzt, um das mittels PIV gemessene Geschwindigkeitsfeld einer (hier: natürlichen) Konvektionsströmung zeitschrittweise als Ausgangsbasis zur Lösung der Energiegleichung zu verwenden, womit die Temperaturverteilung in der Ebene des Laserlichtschnitts erhalten wird. Bei der Simulation wird auf die Einhaltung der entsprechenden Konvergenz- und Stabilitätskriterien geachtet.

PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV)

Funktionsweise

Bei PIV werden Partikel in Form eines möglichst auftriebsneutralen Tracers in die Strömung eingebracht, die durch ihre Streueigenschaften die Strömung sichtbar machen können. PIV beruht auf dem Prinzip der Mie-Streuung (Raffel et al. 2007), welche an kugelförmigen Teilchen auftritt, deren Radius sich in der gleichen Größenordnung wie die Wellenlänge der auftreffenden Strahlung befindet. Die Seedingpartikel sollten außerdem eine hohe Dichte aufweisen. Es eignen sich beispielsweise kleine Ölpartikel (z.B. Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat, kurz DEHS) mit einem durchschnittlichen Durchmesser von $1,0\mu\text{m}$ (Raffel et al. 2007). Der Tracer wird dann, wie in Abbildung 1 dargestellt, von einem doppelt gepulsten Laser (hier: Nd:YAG Laser der Wellenlänge 532nm), der durch eine Lichtschnittoptik in eine Ebene aufgespannt wird, zwei Mal innerhalb eines Zeitintervalls im Mikrosekundenbereich beleuchtet. Eine hochauflösende CCD-Kamera ist über eine Synchronisationseinheit an den Laser gekoppelt und kann so zeitgleich das beleuchtete Seeding aufnehmen (Raffel et al. 2007). Aus dem raumzeitlichen Versatz der Partikel kann der Betrag der Geschwindigkeitskomponenten berechnet werden. Dazu wird der aufgenommene Bereich in einzelne Abfragefenster unterteilt. Diese enthalten meh-

rere Pixel, welche wiederum unterschiedliche Intensitäten aufgezeichnet haben. Durch Kreuzkorrelation werden die Pixelintensitäten zu beiden Zeitschritten im gesamten Abfragefenster verglichen. Damit wird die Wahrscheinlichkeit ermittelt mit der die gleichen Seedingteilchen in einem Pixel des ersten Bildes, in einem Pixel des zweiten Bildes auftauchen. Aus der Korrelation mit der höchsten Wahrscheinlichkeit ergibt sich der räumliche Versatz, welcher dem ganzen Abfragefenster zugeschrieben wird. Mit Hilfe der bekannten Zeitlücke zwischen den Doppelbildern kann die Geschwindigkeit berechnet werden. Stereoskopische Aufnahmen mit zwei Kameras (oder tomographische mit vier oder mehr Kameras) ermöglichen zusätzlich zur Bestimmung der Geschwindigkeitskomponenten in einer Ebene (bzw. volumetrisch) auch die Bestimmung der Geschwindigkeitskomponente senkrecht zu dieser Ebene (Raffel et al. 2007, Weingärtner 2011).

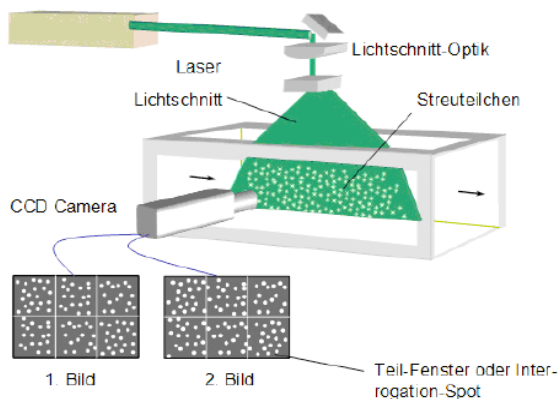


Abb. 1: Prinzipbild einer PIV Messung

Durchführung der Messungen

Aufgrund der hohen Energiedichte des Lasers wird die Wärmeabgabe des Menschen durch eine mit speziellem Glasfasergewebe geschützte, beheizte Messpuppe simuliert (Brandgefahr; Vermeidung einer Verfälschung durch Rauchschlierenbildung). Die Anordnung der Messgeräte wird so gewählt, dass der Kopf- und Schulterbereich, sowie die Konvektionsströmung über dem Körper möglichst vollständig abgebildet werden. Abbildung 2 zeigt die beiden Kameras, sowie die Quelle des Laserlichts, welches über einen Lichtführungsarm zu einer Licht-

schnittoptik geführt und in eine Ebene aufgefächert wird. Auf diese Weise kann das Seeding (DEHS) auf der Seite des Lasers, sowie in einem ausreichend großen Bereich über dem Körper in einer Ebene beleuchtet werden. Messdaten auf der gegenüberliegenden Seite der Messpuppe zu erhalten ist in dieser Konfiguration nicht möglich.



Abb. 2: Anordnung von Messpuppe, Kameras und Laserlichtschnitt

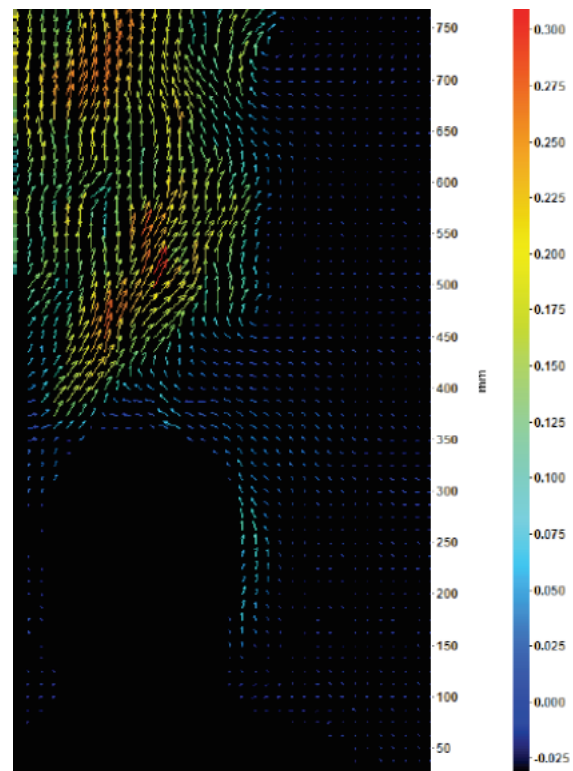


Abb. 3: Ausschnitt des gemessenen Geschwindigkeitsfeldes in [m/s] über Manikin (v_y -Komponente farbig dargestellt)

Für die Lösung der Energiegleichung müssen die Strömungscharakteristika am Einströmungsbereich und die Temperaturrandbedingungen bekannt sein. Die Bestimmung

der Einströmung gestaltet sich bei freier Auftriebsströmung einfacher, wohingegen die Randbedingungen der übrigen Ränder messtechnisch ermittelt werden müssen. Die Oberflächentemperatur der Messpuppe wurde hierfür mit einer Wärmebildkamera vom Typ Flir B4 bestimmt. Die übrigen Ränder wurden mit Hilfe der Ergebnisse von Temperaturmessdioden des Typs FH AD46-2 interpoliert.

Messergebnis

Resultat der Messung sind mehrere Bildpaare, welche die beleuchteten Seedingpartikel darstellen. Nach einer Kalibrierung der Kamerabilder können die Vektorfelder berechnet werden. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt eines erhaltenen Vektorfeldes.

TEMPERATURFELDBERECHNUNG

Grundlage für die Berechnung der Temperaturverteilung im Fluid bildet die Energiegleichung der Strömungsmechanik (Bejan 1993, Griebel et al. 1998). Diese lautet mit konstanter Wärmeleitfähigkeit λ , vernachlässigbarer viskoser Dissipation und unter der Annahme eines Boussinesq-inkompressiblen Fluids ($\partial p / \partial t = 0$) mit der Wärmediffusivität $\alpha = \lambda / (\rho c_p)$, Dichte ρ und spezifischer Wärmekapazität c_p ,

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}$$

Die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors v_i sind aus der PIV Messung bekannt und liegen auf einem kartesischen Gitter vor. Die numerische Lösung der Gleichung erfolgt mit Hilfe der Finite Differenzen Methode. Dabei werden die räumlichen Ableitungen durch zentrale Differenzenquotienten approximiert. Um eine räumlich stabile Lösung zu erhalten ist auf eine möglichst hohe Punktdichte bei der Messung zu achten, da das Messgitter zugleich das Netz für die Simulation vorgibt. Im Anwendungsbeispiel wurde eine äquidistante Vermaschung mit einem Abstand von 3,1mm zwischen den Knoten erzielt. Die zeitliche Ableitung wird zunächst durch einen Differenzenquotienten mit Genauigkeit erster Ordnung ersetzt. Für die Lösung wird aus

Stabilitätsgründen ein implizites Verfahren gewählt, womit eine Anpassung an die Aufnahmefrequenz des Messgeräts ermöglicht wird. Die Anforderungen expliziter Verfahren an den Zeitschritt können vom Messgerät nur selten eingehalten werden. Interpolationen zwischen den Zeitschritten sind zwar möglich, dienen jedoch nicht der Automatisierung des Prozesses. Die Abbildung instationärer Zustände ist somit in erster Linie durch die Aufnahmefrequenz des Messgeräts begrenzt. In diesem Fall konnten hardwarebedingt 7,223Hz erreicht und die Strömung somit alle 0,14s dargestellt werden.

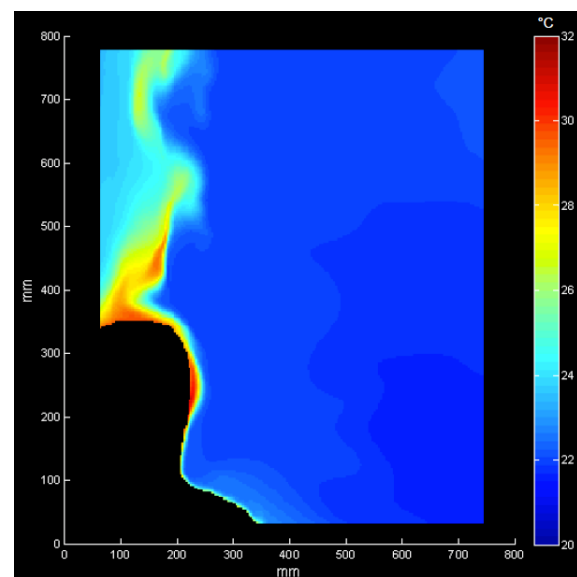


Abb. 4: Temperaturfeld über Manikin

Um die Differentialgleichung auf dem Messgebiet numerisch lösen zu können ist es notwendig, Randbedingungen zu definieren. Hierfür wurden an Einströmrändern Dirichlet-RB verwendet, welche wie oben beschrieben gemessen und interpoliert wurden. An Ausströmrändern wurden Neumann-RB angesetzt, wobei diese der Annahme eines adiabatischen Grenzbereichs genügen. Da durch eine stereoskopische Messung lediglich eine Ebene abgebildet wird, ist es nicht möglich den Temperaturverlauf senkrecht zur Messebene zu bestimmen. Die Energiegleichung reduziert sich demnach auf ihre zweidimensionale Form.

Umsetzung

Die Lösung der diskretisierten Gleichung erfolgt in MATLAB. Die Messdaten, so-

wohl der Randbedingungen, als auch der Strömung werden in das Programm eingelesen und dienen als Eingangsdaten für die Belegung des Gleichungssystems eines jeden Zeitschritts.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Durch Lösen der Gleichungssysteme ist es möglich für jeden gemessenen Zeitpunkt räumlich hoch aufgelöste Temperaturverteilungen zu erhalten. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis zu den Daten aus Abbildung 3 für das gesamte Messgebiet.

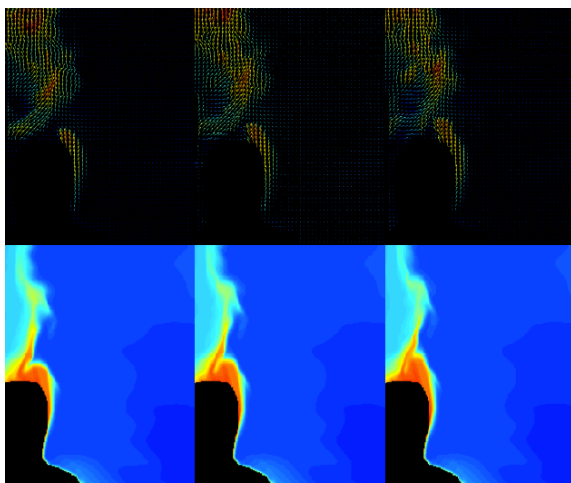


Abb. 5: Vergleich Geschwindigkeitsfeld und Temperaturfeld als Zeitreihe

Ein Vergleich zwischen den PIV Messungen und den berechneten Temperaturfeldern ermöglicht die Nachvollziehung des Energietransports durch die Strömung. Zudem zeigt Abbildung 5, wie auch instationäre Vorgänge durch diese Vorgehensweise dargestellt werden können.

AUSBLICK

Die Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten eines Wärmeübertragungsprozesses erfordert die Bestimmung von Temperaturgradienten an der Grenze des Übergangs zwischen Fluid und Solid. Die erhaltene Temperaturverteilung aus der an die Messung gekoppelten Simulation bietet hierfür die notwendige Dichte an Informationen für die Bestimmung der Koeffizienten, sofern ein geeignetes Interpolationsverfahren eingesetzt wird. Hieran wird im Weiteren gearbeitet. Tomographische PIV Versuche ermöglichen es über die stereoskopische PIV

hinaus durch die Verwendung von vier oder mehr Kameras ein dreidimensionales Messgebiet zu erfassen. Die Energiegleichung kann analog in ihrer dreidimensionalen Form gelöst und der Temperaturverlauf in einem Volumen bestimmt werden. Weitere Arbeiten berücksichtigen eine Erweiterung um ein Feinstruktur-Turbulenzmodell.

DANKSAGUNG

Die Arbeiten wurden u.a. im Rahmen der internen Programme der Fraunhofer Gesellschaft gefördert, Fördernummer Attract 692 239.

REFERENZEN

- Bejan A. (1993). Convection Heat Transfer, John Wiley & Sons Inc.
- Griebel M., Dornseifer T., Neunhoffer T. (1998). Numerical simulation in fluid dynamics – A practical introduction. Philadelphia.
- Lozano A., Yip B., Hanson R.K. (1992). Acetone: a tracer for concentration measurements in gaseous flows by planar laser-induced fluorescence. Experiments in Fluids (13) 369-376.
- Mitterhofer M. (2011). Temperaturfeldberechnung aus einer Particle Image Velocimetry Messung. Bachelor Thesis, TU München.
- Raffel M., Kompenhans J., Wereley S.T. (2007). Particle Image Velocimetry – A Practical Guide. Berlin, Heidelberg.
- Sakakibara J., Adrian R.J. (2004). Measurement of temperature field of a Rayleigh-Benard convection using two-color laser-induced fluorescence, Experiments in Fluids (37) 331–340.
- van Treeck C., Rank E., Krafczyk M., Tölke J., Nachtwey B. (2006). Computers and Fluids, 35: 863-871. Elsevier.
- van Treeck C., Weingärtner B., Mitterhofer M. (2011). Particle Image Velocimetry. Fraunhofer IPB, Report 515, (38).
- Weingärtner B. (2011). Ausschreibung, Inbetriebnahme eines laserbasierten Messsystems zur stereoskopischen Erfassung von Raumluftrömungen. Diplomarbeit, TU München.
- Zitzmann T., Pfrommer P., Cook M. (2006). Simulation dynamisch-thermischen Langzeitverhaltens in Gebäuden mittels CFD. Bauphysik 28. Berlin.