



Doctoral Thesis

Entwicklung einer holografischen Interferometriemethode zur Erfassung wandnaher Temperaturfelder

Author(s):

Müller, René

Publication Date:

1997

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001878250> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH ex. B

Diss. ETH Nr. 12309

Entwicklung einer holografischen Interferometriemethode zur Erfassung wandnaher Temperaturfelder

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

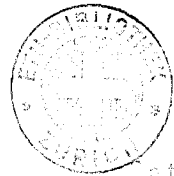
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

RENÉ MÜLLER

Dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 26. Juli 1964
von Zürich



Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. M. K. Eberle, Referent
Prof. Dr. P. Suter, Korreferent

1997

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, mit der Entwicklung einer hochauflösenden, opto-elektronischen Messtechnik ein Werkzeug bereitzustellen, welches die Untersuchung von Wärmetransportvorgängen in thermischen Grenzschichten von Gasströmungen ermöglicht.

Zur Zeit existiert keine geeignete Messmethode, die es erlaubt, in Gasen oder Flüssigkeiten die vollständigen Informationen über die Temperaturverteilung im wandnahen Bereich zu liefern. Die Arbeit befasst sich daher schwergewichtig mit der Herleitung, Entwicklung und Anwendung der heterodynen holografischen Interferometrie zur Vermessung räumlicher Temperaturfelder. Das Verfahren ermöglicht erstmals, unabhängig von der Lage der Streifen und mit hoher örtlicher Auflösung und Genauigkeit, die Auswertung von holografischen Interferogrammen.

Die konventionelle holografische Interferometrie detektiert die Lage der Streifen in einer planen Projektion oder in einem zweidimensionalen Schnitt der holografischen Rekonstruktion und berechnet den Verlauf der optischen Phase durch Interpolation. Die Intensitätsverteilung zwischen den Streifen ist jedoch im allgemeinen eine unbekannte nichtlineare Funktion. Zudem limitiert das Speckle-Rauschen in der Hologrammrekonstruktion die örtliche Auflösung.

Das Prinzip der holografischen Interferometrie besteht darin, die räumliche Veränderung eines Brechungsindexfeldes, verursacht durch eine unterschiedliche Temperatur-, Druck- oder Stoffkonzentration, auf einem Hologramm aufzuzeichnen und anschliessend mit einem geeigneten Detektionssystem auszuwerten. Beim heterodynen Verfahren wird in der Rekonstruktion eines Doppelbelichtungs-Hologramms zwischen den beiden eingesetzten Referenzwellen eine Schwebungsfrequenz von $10-100\text{kHz}$ eingeführt. Damit entstehen folgende Vorteile gegenüber der konventionellen Interferometrie:

- Detektion der optischen Phase an jedem beliebigen Ort in der dreidimensionalen Rekonstruktion ohne Interpolation
- Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR) durch die Überlagerung frequenzverschobener Speckle-Muster

Das Verfahren ist in seiner Reproduzierbarkeit und örtlichen Auflösung nur durch die Schrittweite des Detektionssystems, den

Masstab der optischen Abbildung und die Detektorgeometrie limitiert. Die Messgenauigkeit für die optische Phase im Interferogramm ist an jedem Ort besser als 0.3° und jeder Messwert ist mit weniger als 20° Abweichung reproduzierbar. Dies bedeutet in einem Phasenfeld von mehreren 1000° eine absolute Genauigkeit von besser als 1%. Falls der Druck und die stoffliche Zusammensetzung eines Gases zwischen zwei Zuständen unverändert bleiben, lassen sich Temperaturdifferenzen als Funktion des optischen Phasenfeldes auf $0.1K$ genau bestimmen. Mittels einer zusätzlichen Referenztemperatur in einem einzelnen Punkt kann daraus die absolute Temperatur auf etwa 1% genau berechnet werden.

Mit dem Ziel, die Messmethode für Untersuchungen des Wärmeübergangs auszulegen und zu optimieren, werden die grundlegenden physikalischen Gleichungen dargestellt, die den Wärmeübergang auf molekularer Ebene beschreiben. Der Stand der Technik in bezug auf das Verständnis der Wärmetransport-Mechanismen im μm -Bereich bildet den theoretischen Hintergrund zur Entwicklung des heterodynen Verfahrens. Die vereinfachenden empirischen Gleichungen zur Berechnung des Wärmeübergangs stellen eine qualitative, theoretische Vergleichsmöglichkeit zu den holografisch ermittelten Temperaturen dar. Im weiteren dienen Thermoelement-Messungen im Gas zur zusätzlichen Abstützung der ermittelten Temperaturen.

Die heterodyne holografische Interferometrie wird im Rahmen dieser Arbeit an einem laminaren Fall entwickelt, um deren Möglichkeiten und Grenzen erstmals umfassend zu ergründen und die wichtigsten Einflussgrößen in der Anwendung zu dokumentieren. Anhand eines eigens dafür konstruierten Laboraufbaus werden zunächst die bestimmenden physikalischen Größen untersucht und die notwendigen Gleichungen zu deren Quantisierung hergeleitet.

In der Anwendung am Versuchsträger zur Untersuchung des Wärmeübergangs wird die örtliche Temperatur in einer laminaren Kanalströmung zwischen einem Heissgas und verschiedenen gekühlter Probenplatten aus Stahl und Titan gemessen. Dabei ist die Genauigkeit der Temperaturgradienten im Gas besser als $0.1K$ messbar. An luftgekühlten Anordnungen können bis auf wenige μm an die Plattenoberfläche Messwerte erfasst werden. Auch bei den messtechnisch schwierigeren, wassergekühlten Anordnungen, können in jedem Fall zuverlässige Messdaten unterhalb $100\mu m$ an der Wand erfasst werden. Die prinzipielle örtliche Auflösungsgrenze

des Verfahrens ist deutlich besser als die durch das eingesetzte Positionier- und Detektorensystem gegebene Auflösung von $\pm 2\mu\text{m}$. Für jede Konfiguration wurden mehrere Messungen durchgeführt, wobei sich unter den einzelnen Messungen minimalste Abweichungen ergaben.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass bei der untersuchten Anordnung die maximale Temperaturdifferenz vom Gas zur Wand auf $\pm 2\%$ und der daraus ermittelte konvektive Wandwärmestrom auf $\pm 5\%$ genau messbar ist. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird gemäss seiner physikalischen Definition aus der Ableitung des momentanen Temperaturprofils und des Gaswärmeleitkoeffizienten nahe an der Wandoberfläche berechnet und ist mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 7\%$ bestimmt.

Der Strahlungsanteil wird in der Theorie und in der Holografie zur Konvektion addiert und kann daher in der Gegenüberstellung vernachlässigt werden. Beim Einsatz von Thermoelementen im Gas zur Angabe einer weiteren, unabhängigen Vergleichsmessung muss die Strahlung aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Gas und Wand berücksichtigt werden. Die Thermoelemente im Gas liefern aufgrund der Messungen mit und ohne Abschirmung sowie des entsprechenden theoretisch erwarteten Unterschiedes eine Messgenauigkeit von $\pm 10\%$.

Die Gegenüberstellung der einzelnen Messergebnisse für den untersuchten atmosphärischen, laminaren Fall zeigt, dass kein Einfluss des Wandmaterials auf den Wärmeübergang erkennbar ist. Es sei jedoch erwähnt, dass für die Entwicklung und Überprüfung des Verfahrens bewusst eine Anordnung ohne signifikante Druckgradienten und ohne Reaktionszonen untersucht wurde. Bei vergleichbaren Randbedingungen ist die Oberflächentemperatur bei Titan erwartungsgemäss höher als bei Stahl, die Ableitung des Temperaturprofils an der Wand bleibt jedoch für ähnliche Gastemperaturen unverändert.

Aufgrund der thermischen Dehnungen des Aufbaus ist es für das holografische Verfahren von Vorteil, die zweite Belichtung des Hologramms zeitlich früh durchzuführen. Hingegen wird für den Vergleich des gaseitigen mit dem wandseitigen Wärmestrom das thermodynamische Gleichgewicht nach langer Zeit angestrebt. Die kleinen Temperaturgradienten innerhalb der Probenplatten sind jedoch mit den Thermoelementen auch im thermodynamischen Gleichge-

wicht zu wenig genau bestimmt, um eine zuverlässige Aussage hinsichtlich des wandseitigen Wärmestromes zu erzielen. Mit dieser messtechnischen Feststellung konzentrieren sich die Vergleichsbetrachtungen innerhalb dieser Arbeit auf die gasseitigen Temperaturen und die zweite Belichtung des Hologramms wird bereits in der Aufheizphase durchgeführt. Die holografische Methode ist in der Lage, jederzeit ein räumliches optisches Phasenfeld aufzuzeichnen und hält dabei auch momentane Störungen in der Strömung fest. Im Vergleich dazu geht die Theorie nur von idealen Bedingungen aus.

Unter Berücksichtigung des Messorts im Kanal ergibt die Gegenüberstellung des theoretischen und des holografisch ermittelten Temperaturverlaufs sowie der Thermoelementmessung im Gas eine sehr gute Übereinstimmung.

Abstract

The objective of this thesis is the development and verification of a high-resolution, opto-electronic temperature measurement technique for the investigation on heat transfer mechanisms within thermal boundary layers of gas flows.

Regarding the state-of-the-art, there is no measurement technique available that provides complete information of the local temperature distribution of a fluid close to the wall. The investigations presented in this work focus on the theory, development and verification of heterodyne holographic interferometry for the detection of spatial temperature fields. For the first time, this technique allows the analysis of holographic interferograms with high local resolution and accuracy independent of the fringe position. Using classical holographic interferometry, the fringe position within a planar projection or a two-dimensional spatial area of limited depth of the holographic reconstruction can be detected. Despite the fact that the light intensity between the fringes is a non-linear function, the optical phase distribution has to be calculated by interpolation. Furthermore, high speckle noise within the holographic reconstruction limits the local resolution.

Using holographic interferometry in a fluid, two different spatial refractive index fields are stored on a hologram. Later on, the local phase difference is analyzed with an appropriate detection system. These phase differences are due to local variations of the fluid's temperature, pressure or material properties. With the heterodyne method the two holograms are reconstructed and superimposed with separate reference waves, introducing a constant beat frequency difference of $10\text{-}100\text{ kHz}$ throughout the interferogram. The advantages of the heterodyne over the classical method are:

- the optical phase difference can be detected at any position within the three-dimensional holographic reconstruction without interpolation
- the signal-to-noise ratio (SNR) is significantly increased due to the superposition of two frequency shifted speckle patterns

The local accuracy and reproducibility of the heterodyne method is only limited by the incremental step length of the detection system, the optical magnification in the reconstruction image and the detector

geometry. At every position within the interferogram the optical phase can be measured with an accuracy of less than 0.3° and the reproducibility is better than 20° . Therefore, in a phase field of typically a few 1000° , the overall accuracy of the heterodyne method is better than 1%. If the pressure and material properties of a gas between two states remain constant, the local temperature differences can be calculated as a function of the optical phase with an accuracy of $0.1K$. Together with a single additional reference temperature, the total temperature can be calculated with an accuracy of approximately 1%.

In the present work, the development and optimization of heterodyne holographic interferometry focuses on heat transfer investigations. First, the basic physical equations of molecular heat transfer are discussed. The theory of heat transfer mechanisms in the scale of microns is setting the theoretical background for the development of the heterodyne method. Known empirical equations for the calculation of heat transfer provide a possibility for the qualitative comparison with the holographically determined temperature values. Verification of temperature measurements is also based on conventional thermocouple measurements.

Heterodyne holographic interferometry is developed in a laminar set-up, allowing systematic investigations on the advantages and limitations of the technique. The influence of all important experimental parameters is documented for the application on a special laboratory set-up, that has been built for the investigations of this work. First, the main physical properties and their guiding equations are discussed.

The method is applied in measuring the local temperature in a laminar parallel flow of hot gas between plates of different material (steel or titanium) and cooling conditions. The accuracy for the determination of local temperatures has been found to be better than $0.1K$. In set-ups where the plates are cooled by air, reliable temperature measurements have been performed down to the distance of a few microns to the plate surface. In the more demanding set-up of water-cooling, reliable data could always be measured for distances less than 100 microns from the plate surface.

The local resolution of the method is significantly higher than the resolution of the positioning and detection system of ± 2 microns. Each combination of plate materials, heating and cooling conditions

has been measured several times with minimum variation for a specific set-up.

The sensitivity analysis shows that the maximum temperature difference between gas and wall has been measured with an accuracy of $\pm 2\%$ and, after further calculation, that the convective heat transfer has been determined with an accuracy of $\pm 5\%$. Since temperature values have been measured within the thermal boundary layer very close to the plate surface, wall heat flux can be easily determined. It is calculated through its physical definition, the first derivative of the temperature profile and the heat conduction coefficient of the gas at the wall surface. The accuracy of the calculated convective heat transfer coefficient is within $\pm 7\%$.

In classical as well as in heterodyne holographic interferometry, heat radiation is an additional term to convection in determining the total heat transfer. It has been shown that it is satisfactory for the comparison of theory and experiment to focus on convective heat transfer only.

However, radiative heat transfer is non-negligible in the analysis of thermocouple measurements in a hot gas. As an additional independent measurement method, thermocouples were used for gas temperature measurements. Here, heat radiation occurs due to the temperature difference between the thermocouple and the wall surface. The metal surface of the thermocouples in the hot gas is exposed to the cooler wall. To use the data of these measurements as independent reference values, heat radiation due to the temperature difference between the thermocouple and the wall has to be considered. The thermocouple can't be protected against the burner flame without loss in response time, so the theoretical difference between protected and unprotected thermocouple is assumed. To account for all uncertainties, an accuracy of the thermocouples of $\pm 10\%$ is accepted.

The results for the investigated atmospheric laminar set-up show no influence of the wall material on the heat transfer. It is important to note that this set-up, characterized by the lack of significant pressure gradients and reaction zones, had to be chosen for the development and verification of the heterodyne method. As expected, the surface temperature of titanium is higher than the one of steel at comparable boundary conditions. The temperature profiles at the wall remain approximately the same for similar gas temperatures.

Due to increasing thermal expansion of the set-up, it is much more convenient for the holographic recording to take the second exposure as early as possible. On the other hand, a steady state (obtained after a long time) is necessary for the comparison of the heat flux from the gas versus the heat flux through the wall. But at any time, the temperature gradients within the plate's cross-section are too small compared to the measurement accuracy of the thermocouples. Given this, the main focus for the comparison of the wall heat flux remains on the gas side and the temperatures provided by the holographic method are compared to theoretical profiles. The second holographic exposure is taken during the heat-up phase after the gas temperatures reached their maximum.

As an advantage over known methods, heterodyne holographic interferometry is capable to store a spatial optical phase field instantly at any chosen time. In theory, ideal conditions are assumed, whereas with holography even small deflections of the gas flow are stored.

With respect to the measurement position within the channel, the comparison of the theoretical profiles with the holographic temperature values result in a very good coincidence.