

Reihe 19

Wärmetechnik/
Kältetechnik

Nr. 162

Michael Schaub, M.Sc.
Berlin

Experimentelle Betrachtung der Wärmeübertragung durch instationäre freie Konvektion an der vertikalen Platte

Experimentelle Betrachtung der Wärmeübertragung durch instationäre freie Konvektion an der vertikalen Platte

vorgelegt von
Jan Michael Schaub, M.Sc.
geboren in Marburg

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10.05.2019

Berlin, 2019

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 19

Wärmetechnik/
Kältetechnik

Michael Schaub, M.Sc.
Berlin

Nr. 162

Experimentelle
Betrachtung der
Wärmeübertragung
durch instationäre
freie Konvektion an
der vertikalen Platte

Schaub, Michael

Experimentelle Betrachtung der Wärmeübertragung durch instationäre freie Konvektion an der vertikalen Platte

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 19 Nr. 162. Düsseldorf: VDI Verlag 2019.

124 Seiten, 56 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-18-316219-2, ISSN 0178-9465,

€ 48,00/VDI-Mitgliederpreis € 43,20.

Für die Dokumentation: freie Konvektion – Wärmeübertragung – instationär – vertikale Platte – Luft – experimentell – analytisches Berechnungsverfahren

In der vorliegenden Dissertation werden die Auswirkungen von instationären Prozessen in freier Konvektion an der vertikalen Platte auf die Wärmeübertragung an Luft experimentell untersucht. Die dabei erhobenen Messwerte werden auf der Grundlage einer phänomenologischen Betrachtung in ein analytisches Berechnungsverfahren überführt. So legt eine physikalische Interpretation nahe, dass nach einer plötzlichen Veränderung der Wärmestromdichte ein Überschuss an potentieller Energie in der Strömungsgrenzschicht entsteht, der in einem anschließenden Ausgleichsvorgang durch zusätzliche Konvektionsstrukturen (insb. Kelvin-Helmholtz-Wirbel) in kinetische Energie umgewandelt wird. Betrachtet werden zyklische und sprungartige Variationen der Randbedingungen, deren praktische Anwendung erst durch die Etablierung der elektronischen Leistungsregelung relevant wurde. Derartige Betriebsweisen erlauben beispielsweise für die Wärmeübergabe von Raumheizsystemen eine Intensivierung der Übertragungsleistung bei gleicher mittlerer Oberflächentemperatur.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Zugl.: Berlin, Technische Universität, Diss., 2019

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9465

ISBN 978-3-18-316219-2

Vorwort

Die nachfolgende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Hermann-Rietschel-Institut, dem Fachgebiet Gebäude-Energie-Systeme der Technischen Universität Berlin.

In verschiedenen Forschungsprojekten des Instituts konnten die Potentiale einer instationären Betriebsweise von technischen Komponenten zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Klimatisierung von Aufenthaltsräumen aufgezeigt werden. Die vorliegende Arbeit soll daher einen Beitrag zum Verständnis und zur Berechnung der damit verbundenen instationären Transportvorgänge leisten.

„Die Endlosigkeit des wissenschaftlichen Ringens sorgt unablässig dafür, dass dem forschenden Menschegeist seine beiden edelsten Antriebe erhalten bleiben und immer wieder von neuem angefacht werden: Die Begeisterung und die Ehrfurcht.“

Max Planck, dt. Physiker (1858 – 1947)

Mein Dank für das entgegengebrachte Vertrauen, die inhaltlichen und methodischen Impulse, das fortdauernde Interesse und für ein stets offenes Ohr gilt dem Hauptgutachter Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel. Für die konstruktiven fachlichen Anregungen und die bereitwillige Übernahme der Mitbegutachtung danke ich Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann. Außerdem danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für den fachlichen und freundschaftlichen Austausch, die begeisternde Arbeitsatmosphäre und für die Unterstützung bei der Durchführung der Experimente. Insbesondere danke ich jedoch meiner Familie und meinen Freunden für die fortdauernde Motivation, das Verständnis, die Unterstützung in vielerlei Hinsicht und für all das, was Ihr mir ermöglicht habt.

Berlin, im Frühjahr 2019

Michael Schaub

Inhalt

Vorwort	III
Nomenklatur	VIII
Kurzfassung	XI
Abstract	XIII
1 Freie Konvektion an der vertikalen Platte	1
1.1 Konvektive Wärmeübertragung	2
1.1.1 Räumlicher Bezug der Wärmeübertragungs-Intensität.....	5
1.2 Laminar-turbulente Transition	6
2 Instationäre freie Konvektion	8
2.1 Beschreibung von instationären freien Konvektionsströmungen	9
2.2 Berechnung von instationären Strömungsgrößen	11
2.2.1 Physikalische Vereinfachungen	12
2.2.2 Modellbasierte Vereinfachungen	14
2.3 Weiterführende Betrachtung der instationären Wärmeübertragung.....	17
3 Experimentelle Analyse der Wärmeübertragung durch freie Konvektion an der vertikalen Platte	18
3.1 Versuchsaufbau.....	18
3.1.1 Konstruktion und Umgebungsbedingungen	19
3.1.2 Sandwich-Heizelemente	22
3.1.3 Leistungszufuhr und Regelung.....	24
3.1.4 Messwert-Erfassung.....	26
3.1.5 Betriebsverhalten	28
3.2 Stationäre Validierung.....	29
3.2.1 Bestimmung der Wärmeübertragung aufgrund von Strahlung.....	30
3.2.2 Bestimmung der konvektiven Wärmeübertragung.....	30
3.2.3 Isotherme Oberfläche.....	31
3.2.4 Homogene Wärmestromdichte	33
3.3 Instationäre Bewertungsmethodik	35
3.3.1 Quasi-stationärer Betrachtungsansatz.....	36
3.3.2 Bewertung der instationären Wärmeübertragung	38

3.3.3	Thermische Kapazität der Sandwich-Heizelemente	40
3.3.4	Messunsicherheits-Fortpflanzung	42
3.4	Versuchsreihen mit veränderlichen Randbedingungen	42
3.4.1	Zyklische Variationen.....	42
3.4.2	Sprungartige Änderungen mit anschließender Beharrung.....	50
3.5	Schlussfolgerungen zur instationären Wärmeübertragung	54
4	Phänomenologische Betrachtung	55
4.1	Strömungsvisualisierung	55
4.1.1	Versuchsaufbau zur Strömungsvisualisierung.....	55
4.1.2	Strömungsstrukturen	56
4.2	Strömungsgeschwindigkeiten.....	60
4.2.1	Versuchsaufbau zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten .	61
4.2.2	Geschwindigkeits-Fluktuationen	62
4.3	Schlussfolgerungen zu instationären Strömungsstrukturen	65
5	Analytische Prognose der Wärmeübertragung durch instationäre freie Konvektion.....	66
5.1	Physikalische Modellvorstellung.....	66
5.1.1	Potentielle und kinetische Energie der freien Konvektion	66
5.1.2	Zeitliche Entwicklung der Wärmeübertragung durch freie Konvektion	68
5.2	Prognosemodell zur instationären Wärmeübertragung bei zyklischer Variation der Randbedingungen	69
5.2.1	Validierungsmessungen für zyklische Variationen	70
5.2.2	Instationäre Phase bei zyklischen Variationen.....	73
5.2.3	Momentanwerte von zyklischen Variationen	76
5.2.4	Modellanwendung und Prognosegüte für zyklische Variationen ..	78
5.3	Prognosemodell zur instationären Wärmeübertragung bei sprungartigen Änderungen mit anschließender Beharrung	80
5.3.1	Validierungsmessungen für sprungartige Änderungen	81
5.3.2	Instationäre Phase bei sprungartigen Änderungen.....	83
5.3.3	Momentanwerte von sprungartigen Änderungen	85

5.3.4 Modellanwendung und Prognosegüte für sprungartige Änderungen	87
6 Zusammenfassung.....	89
7 Ausblick.....	93
A Anhang.....	95
A.1 Ergebnisse der Validierungsmessungen für zyklische Variationen	95
A.2 Ergebnisse der Validierungsmessungen für sprungartige Änderungen .	100
Literatur	103

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Bedeutung
Griechische Formelzeichen		
α	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient
β	1/K	isobarer thermischer Volumen-Ausdehnungskoeffizient
δ	m	Grenzschichtdicke
Δ	-	Differenz
ε	-	Gesamtemissionsgrad
ϑ	°C	Temperatur
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
μ	kg/(m s)	dynamische Viskosität
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
Π	-	Verhältnis von Impulsgrößen zu mittleren Größen
ρ	kg/m ³	Massendichte
σ	Pa	mechanische Spannung
τ	s	Zeitkonstante
Lateinische und sonstige Formelzeichen		
a	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit
A	m ²	Fläche
b	-	Regressionsparameter
c	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
C	J/K	thermische Kapazität
\mathcal{D}	kg/(m s ³)	Diffusionsterm
e	J/m ³	spezifische Energie
f	N/m ³	volumenbezogene Kräfte
g	m/s ²	Schwerebeschleunigung
Gr	-	<i>Grashof-Zahl</i>
H	J/kg	spezifische Totalenthalpie
L	m	charakteristische Länge des Strömungsgebiets
m	-	Regressionsparameter
Nu	-	<i>Nußelt-Zahl</i>

Symbol	Einheit	Bedeutung
p	Pa	Druck
Pr	-	<i>Prandtl</i> -Zahl
\dot{q}	W/m ²	spezifische Leistung
Ra	-	<i>Rayleigh</i> -Zahl
Re	-	<i>Reynolds</i> -Zahl
s	-	Standardabweichung (Grundgesamtheit)
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
Tu	%	Turbulenzgrad
u	m/s	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung
v	m/s	Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung
V	m ³	Volumen
\dot{V}	m ³ /h	Volumenstrom
w	m/s	Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung
x	-	Richtungskomponente (vertikal in Plattenebene)
y	-	Richtungskomponente (normal zur Plattenebene)
z	-	Richtungskomponente (horizontal in Plattenebene)

Indices und Abkürzungen

*	modifiziert (Randbedingung Wärmestromdichte)
+	dimensionslos
—	zeitliches Mittel
∞	ungestörtes Umgebungsfluid
0	Referenzniveau der Stoffwerte
1τ	Zeitraum für 63,2 % der Sprungantwort
c	konvektiv
char	charakteristisch
el	elektrisch
F	Fluid
is	instationär
isPh	instationäre Phase
kin	kinetisch

Symbol	Bedeutung
L	geometrisches Mittel der charakteristischen Länge
lam	laminar
LSB	Bitwertigkeit (engl. least significant bit)
m	arithmetisches Mittel
max	Maximum
MB	Messbereich
min	Minimum
MW	Messwert
O	(Umgebungs-)Oberfläche
p	bei konstantem Druck
pot	potentiell
r	radiativ (Wärmestrahlung)
st	stationär
t	thermisch
turb	turbulent
W	(beheizte) Wandoberfläche
x	Ort auf Richtungskomponente x
y	Ort auf Richtungskomponente y
z	Ort auf Richtungskomponente z

Kurzfassung

Die vorliegende Ausarbeitung untersucht den Einfluss von instationären Strömungsstrukturen in freier Konvektion auf die Wärmeübertragung von einer vertikalen Platte an Luft. Dazu werden die mittlere und die momentane Intensität der konvektiven Wärmeübertragung für zyklische und sprungartig variierende Betriebsweisen einer direkt-elektrisch beheizten, 2 m hohen Kupferplatte experimentell erfasst.

Bei Dauerbetriebstemperaturen von maximal 100 °C und Impuls-Wärmestromdichten von bis zu 1.430 W/m² werden sowohl laminare, als auch transiente und turbulente Strömungsformen betrachtet. Im Vergleich zur einer quasi-stationären Betrachtungsweise tritt im instationären Fall eine mittlere Intensivierung der konvektiven Wärmeübertragung von maximal 23,8 % bei zyklischen Variationen der Randbedingungen und von bis zu 30,2 % bei sprungartigen Änderungen auf. Die stärkste Beeinflussung der konvektiven Wärmeübertragung durch eine instationäre Betriebsweise zeigt sich im Bereich der kritischen *Grashof*-Zahl, also zu Beginn der laminar-turbulenten Transition. Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Wärmeübertragungs-Intensität treten die größten Überschreitungen des quasi-stationären Vergleichsniveaus stets zum Ende eines Wärmestrom-Impulses auf.

Phänomenologische Betrachtungen der instationären Konvektionsströmung in Form von Visualisierungen zeigen bei einer impulsartigen Wärmestromzufuhr eine temporär verstärkte Durchmischung der Grenzschicht. Exemplarische Messungen zur zeitlichen Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Grenzschicht zeigen dabei ebenfalls stark ausgeprägte irreguläre Fluktuationen. Die phänomenologischen Beobachtungen legen daher nahe, dass überschüssige potentielle Energie, die durch einen hinreichend intensiven Wärmestrom-Impuls plötzlich in eine Auftriebsströmung eingebracht wird, zunächst durch das temporäre Aufkommen von großskaligen Rotationsbewegungen in kinetische Energie umgewandelt wird, bevor sich eine quasi-stationäre Strömungsentwicklung einstellt.

Die Grenzschichtfluktuationen stehen darüber hinaus in guter zeitlicher Übereinstimmung mit der instationären Phase der Wärmeübertragung. Die vorübergehende Intensivierung des konvektiven Wärmetransports wird dement-

sprechend auf eine kurzzeitig verstärkte Durchmischung der Grenzschicht zurückgeführt.

Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse, für die eine sehr gute quantitative und qualitative Reproduzierbarkeit vorliegt, wird ein analytisches Berechnungsmodell vorgestellt. Als zentrale Einflussgrößen werden darin die mittlere *Grashof*-Zahl und eine dimensionslose Kennzahl Π berücksichtigt, welche als Maß für den mittleren Überschuss der potentiellen Energie innerhalb der instationären Phase interpretiert wird.

Das Berechnungsmodell erlaubt sowohl die Prognose der mittleren, als auch der momentanen Wärmeübertragungs-Intensität durch instationäre freie Konvektionsströmungen an der vertikalen Platte. So eröffnet sich für derartige Wärmeübertrager durch eine gezielte Variation der Betriebsweise die Möglichkeit zu einer Intensivierung der Übertragungsleistung bei gleichen mittleren Oberflächentemperaturen oder zu einer Reduzierung der mittleren Oberflächentemperaturen bei gleicher Übertragungsleistung.

Abstract

The present elaboration investigates the influence of unsteady flow structures in natural convection on the heat transfer from a vertical flat plate to air. Therefore, the mean and momentary intensity of convective heat transfer are determined experimentally for cyclic and step-like changes in the operation mode of a direct-electrically heated, 2 m high copper plate.

At continuous operating temperatures of max. 100 °C and impulse heat flux densities of up to 1,430 W/m², laminar, transitional and turbulent flows are considered. Compared to a quasi-stationary approach, in the unsteady case, a maximum increase in the mean convective heat transfer of 23.8% occurs for cyclic variations of the boundary conditions and of up to 30.2% for step-like changes. The strongest influence of an unsteady operation mode on the convective heat transfer occurs in the range of the critical *Grashof* number – i.e. at the beginning of the laminar-turbulent transition. In terms of the temporal development of the heat transfer intensity, the largest exceedances of the quasi-stationary comparison level consistently occur at the end of a heat flux impulse.

Phenomenological observations of the unsteady convection flow in the form of visualizations show a temporarily increased mixing of the boundary layer in the case of an impulse-like heat flux supply. Exemplary measurements of the temporal development of the flow velocities within the boundary layer also show very distinctive irregular fluctuations. Thus, the phenomenological observations indicate that surplus potential energy, which is suddenly transferred into a buoyant flow by a sufficiently intensive heat flux impulse, is initially converted into kinetic energy through the temporary appearance of large-scale rotational structures, before a quasi-stationary flow development occurs.

Furthermore, the boundary layer fluctuations are in good temporal agreement with the unsteady phase of heat transfer. The temporary enhancement of the convective heat transport is accordingly attributed to a short-time intensified mixing of the boundary layer.

Based on the experimental results, for which a very good quantitative and qualitative reproducibility prevails, an analytical calculation model is presented. The mean *Grashof* number and a dimensionless parameter Π (which is interpreted

as a measure of the mean potential energy surplus within the unsteady phase) are considered as main influencing quantities.

The calculation model allows the prediction of the mean as well as the momentary heat transfer intensity due to unsteady natural convection flows at the vertical plate. Consequently, for these type of heat exchangers, an unsteady operation mode allows an increase in the heat transfer intensity for the same average surface temperatures or a decrease in the average surface temperatures for the same heat transmission rate.