

Christian Leprich

Wärmeübergangskoeffizienten in durchströmten Rohren und an Außenflächen

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2002 Diplom.de
ISBN: 9783961164509

**Wärmeübergangskoeffizienten in durchströmten Rohren
und an Außenflächen**

1	Einleitung.....	1
1.1	Überblick Wärmeübertragung.....	1
1.2	Bedeutung und Definition des Wärmeübergangskoeffizienten.....	2
2	Konvektiver Wärmeübergang bei freier Strömung.....	5
2.1	Wärmeübergang an senkrechten Wänden nach VDI Wärmeatlas 1974.....	8
2.2	Wärmeübergang an vertikalen Flächen und Zylindern nach VDI Wärmeatlas 1997.....	14
2.3	Wärmeübergang an vertikalen Wänden nach A.F. Mills.....	19
2.4	Wärmeübergang an senkrechten Wänden nach Wagner.....	24
2.5	Wärmeübergang an waagerechten Zylindern nach VDI Wärmeatlas 1974.....	29
2.6	Wärmeübergang an waagerechten Zylindern nach VDI Wärmeatlas 1997.....	35
2.7	Wärmeübergang an waagerechten Zylindern nach Cerbe / Hoffmann.....	40
2.8	Wärmeübergang an waagerechten Zylindern nach Wagner.....	45
2.9	Gemessener Wärmeübergang an der Außenseite eines Zylinders.....	50
3	Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsgleichungen bei freier Strömung.....	62
3.1	Wärmeübergang an senkrechten Wänden.....	62
3.2	Wärmeübergang an waagerechten Zylinder.....	67
4	Konvektiver Wärmeübergang bei erzwungener Strömung an Körpern.....	72
4.1	Wärmeübergang bei der Strömung längs einer ebenen Wand nach VDI Wärmeatlas 1974.....	76
4.2	Wärmeübergang bei der Strömung längs einer ebenen Wand nach Cerbe / Hoffmann.....	82
4.3	Wärmeübergang bei der Strömung längs einer ebenen Wand nach A.F. Mills.....	87
4.4	Wärmeübergang bei der Strömung längs einer ebenen Wand nach Friedrich Hell.....	92

4.5	Wärmeübergang bei Querströmung um einzelne waagerechte Zylinder nach VDI Wärmeatlas 1974.....	97
4.6	Wärmeübergang bei Querströmung um einzelne waagerechte Zylinder nach Cerbe / Hoffmann.....	103
4.7	Wärmeübergang bei Querströmung um einzelne waagerechte Zylinder nach Wagner.....	108
4.8	Wärmeübergang bei Querströmung um einzelne waagerechte Zylinder nach Mills.....	113
4.9	Gemessener Wärmeübergang an der Außenseite bei Querströmung um einen Zylinder.....	118
5	Konvektiver Wärmeübergang bei der Strömung durch Rohre.....	131
5.1	Wärmeübergang bei der Strömung durch Rohre nach VDI Wärmeatlas 1974.....	136
5.2	Wärmeübergang bei der Strömung durch Rohre nach VDI Wärmeatlas 1997.....	148
5.3	Wärmeübergang bei der Strömung durch Rohre nach Cerbe / Hoffmann.....	156
5.4	Wärmeübergang bei der Strömung durch Rohre nach Wagner.....	163
6	Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsgleichungen bei erzwungener Strömung.....	171
6.1	Wärmeübergang bei der Strömung längs einer ebenen Wand.....	171
6.2	Wärmeübergang bei Querströmung um einzelne Zylinder.....	176
6.3	Wärmeübergang bei der Strömung durch Rohre.....	181
7	Zusammenfassung.....	187
8	Tutorial.....	190
8.1	Auflistung vorhandener Excel-Dateien.....	190
8.2	Aufbau und Beschreibung der Excel-Arbeitsblätter.....	192
9	Literaturverzeichnis.....	196
10	Anhang.....	198

Verwendete Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Größe	Einheiten
---------------	-------	-----------

lateinische Buchstaben:

A	Fläche	m ²
c ₁₂	Strahlungsaustausch	W/(m ² *K ⁴)
cp	spezifische Wärmekapazität des Fluids	J/(kg*K)
c _s	Strahlungskonstante	5,670 W/(m ² *K ⁴)
D	Rohraußendurchmesser	m
d	Durchmesser	m
g	Erdbeschleunigung	9,81 m/s ²
Gr	Grashof-Zahl	1
L	charakteristische Abmessung	m
m	Masse	kg
Nu	Nußelt-Zahl	1
Pr	Prandl-Zahl	1
Q	Wärmeleistung	W
Ra	Rayleigh-Zahl	1
Re	Reynolds-Zahl	1
s	Wanddicke	m
T	Temperatur	K
U	Umfang	m
V	Volumen	m ³
w	Geschwindigkeit	m/s

griechische Buchstaben:

α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² *K)
β	Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
ε	Emissionsverhältnis	1
γ	Intermittenzfaktor	1
η	dynamische Viskosität	kg/(m*s)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m*K)
ν	kinetische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
τ	Zeit	s
υ	Temperatur	K
ζ	Druckverlustbeiwert	1



Formelzeichen	Größe	Einheiten
---------------	-------	-----------

tiefgestellte Zeichen:

$O_{1,2,3}$	Aufzählung
O_4	Umgebung, Raum
O_a	außen
O_A	Austritt
O_E	Eintritt
O_{ges}	gesamt
O_h	hydraulisch
O_i	innen
O_{kon}	bei Konvektion
O_{kr}	kritische
O_{lam}	laminar
O_{log}	logarithmisch
O_m	mittlere
O_o	Oberfläche
O_{str}	bei Strahlung
O_{turb}	turbulent
O_w	Wand

1. Einleitung

Temperaturunterschiede gleichen sich stets mit der Zeit aus. Entsprechend dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre geht dabei die Wärme vom Körper mit der höheren Temperatur auf den Körper mit der niedrigeren Temperatur über. Dieser Vorgang ist nicht umkehrbar, es handelt sich hier um einen sogenannten irreversiblen Vorgang. Er kommt in der Technik sehr häufig vor, deshalb ist es von großer Bedeutung, die Gesetzmäßigkeiten zu kennen, nach denen diese Wärmeübertragung verläuft.

1.1 Überblick Wärmeübertragung

Energie in Form von Wärme kann durch drei verschiedene Vorgänge übertragen werden, für die unterschiedliche Gesetze gelten. /1/

Häufig treten alle drei Arten der Übertragung gemeinsam auf, die jedoch getrennt behandelt werden. Die drei Vorgänge sind:

Wärmeleitung, Konvektion oder Strahlung.

Unter Wärmeleitung versteht man den Energietransport innerhalb eines Stoffes (fester Körper, Flüssigkeit oder Gas) unter der Wirkung eines Temperaturgefälles, wobei thermische Energie von einem Molekül zum anderen weitergegeben wird.

Man unterscheidet stationäre Wärmeleitung, d.h. bei zeitlich unveränderliche Temperaturfelder und nichtstationäre Wärmeleitung, d.h. bei sich zeitabhängig ändernden Temperaturen.

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) \quad (1-1)$$

Bei der Wärmeübertragung durch Konvektion (hergeleitet vom lat. *convectio* = Zusammenbringung) wird Wärme durch Berührung oder Mitführung zwischen einem flüssigen oder gasförmigen Medium und einer festen Begrenzungswand, z.B. Außenfläche eines Körpers, oder umgekehrt übertragen.

Die Teilchen eines Fluids setzen sich infolge einer Zufuhr bzw. Abfuhr von Wärme an der Berührungsfläche zwischen dem festen Körper und dem Fluid in Bewegung und führen diese Energie mit sich, die wiederum durch die einsetzende Strömungsbewegung übertragen wird.

Wenn dabei die Strömung aufgrund temperaturbedingter Unterschiede in der Dichte als Auftriebs- bzw. Abtriebsströmung zustande kommt, heißt die Bewegung freie Konvektion.

Wird die Strömung mechanisch durch Druckunterschiede (Pumpen, Ventilatoren, geodätisches Gefälle) erzeugt und aufrechterhalten, so nennt man die Bewegung erzwungene Konvektion.

Außerdem unterscheiden wir noch die turbulenten und die laminaren Strömungen. Bei turbulenter Strömung an einer beheizten Wand wandern ständig warme Fluidteilchen

von der Wand in den Strömungskern, wo sie sich abkühlen und mit dem kalten Fluid vermischen, während sich zugleich kalte Teilchen aus dem Kern der Strömung zur Wand hin bewegen, um sich dort zu erwärmen.

Bei laminarer Strömung mischen sich die Fluidteilchen nicht. Der Wärmeübergang quer zu den laminaren Schichten kann nur durch reine Wärmeleitung erfolgen, so wie es in einer ruhenden Flüssigkeit der Fall ist.

Grundlagen für die Darstellung von Vorgängen des konvektiven Übergangs bildet die Ähnlichkeitstheorie. Sie besagt, dass physikalische Vorgänge von bestimmten dimensionslosen Kenngrößen abhängen. Sind diese Kenngrößen bekannt, kann man mit ihrer Hilfe nicht nur Versuchsergebnisse verallgemeinern, sondern auch neue Versuchsreihen planen. Voraussetzung für die Übertragbarkeit von Ergebnissen ist, daß die Kenngrößen beim Modell und bei Ausführung die gleichen Zahlenwerte haben.

Dann liegt eine physikalische Ähnlichkeit vor, die wiederum die Zahl der Einflußgrößen deutlich mindert. Somit können Wärmeübergangsgesetze allgemein für geometrisch ähnliche Körper und die verschiedensten Stoffe einheitlich formuliert werden.

Die Berechnung des Wärmeübergangs erfolgt mit der Grundgleichung nach Newton:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (1-2)$$

Newtonschen Ansatz für den Wärmeübergang /6/

Die dritte Art des Wärmetransports ist die Wärmeübertragung durch Strahlung.

Hierbei wird aus der fühlbaren Wärme eines Körpers ein kontinuierliches Spektrum elektromagnetischer Wellen erzeugt (Emission), die bei der Absorption in einem zweiten Körper wieder in fühlbare Wärme verwandelt werden, ohne daß zwischen beiden Körpern ein materieller Träger benötigt wird.

$$\dot{Q} = \alpha_{\text{str}} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (1-3)$$

1.2 Bedeutung und Definition des Wärmeübergangskoeffizienten α

Mit der Wärmeübergangszahl wird der Wärmestrom (Wärmeleistung) bezeichnet, der bei einer wirksamen Temperaturdifferenz $\Delta T = 1\text{K}$ von einer Wand mit der Fläche $A = 1\text{m}^2$ an ein Fluid (Flüssigkeit oder Gas) und umgekehrt übergeht.

Der Wärmeübergangskoeffizient faßt eine Reihe von Einflüssen zusammen, die von der Wärmeleitung und von der Wärmekonvektion her den Wärmeübergang beeinflussen.

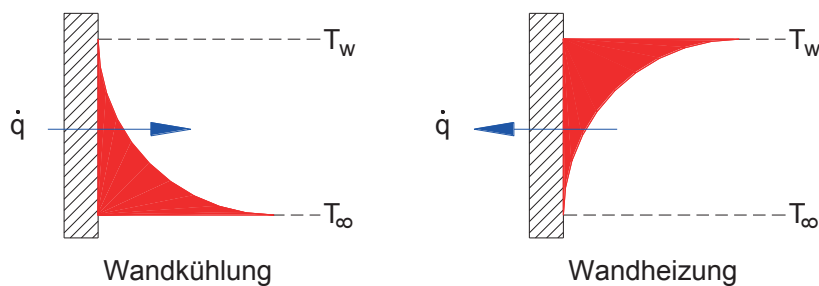
Hierbei wirken sich neben der Temperaturdifferenz, Druck, Wärmeleitzahl, Dichte, spezifische Wärme und Viskosität insbesondere die Strömungsgeschwindigkeit und die Art der Strömung (laminar oder turbulent) aus.

Auch die Lage der Übergangsfläche zur Strömungsrichtung des Fluids, sowie Gestalt und Oberfläche des Körpers nehmen Einfluß auf die Wärmeübergangszahl.

Die Wärmeübergangszahl ist keine Stoffeigenschaft, sondern faßt alle beeinflussenden Größen bei einem Wärmetransport zusammen. (Übertragungswiderstand)

Der örtliche Wärmeübergangskoeffizient für Außenflächen ist nach /5/ definiert als:

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{\dot{q}}{\Delta T} \quad \text{mit } \Delta T = T_w - T_\infty \quad (1-4)$$



Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient α über die Rohrlänge L ist nach /12/ definiert durch die Gleichung:

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta t_{\log} \quad (1-5)$$

Darin ist die logarithmische Temperaturdifferenz:

$$\Delta t_{\log} = \frac{t_A - t_E}{\ln \frac{t_W - t_E}{t_W - t_A}} \quad (1-6)$$

mit der Eintrittstemperatur t_E und der Austrittstemperatur t_A des Mediums sowie der Wandtemperatur t_W enthalten.

Alle Stoffdaten, die für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten notwendig sind, werden beim Druck $p = 1 \text{ bar}$ und mit der mittleren Temperatur t_m ermittelt.

$$t_m = \frac{t_O + t_\infty}{2} \quad \text{bzw.} \quad t_m = \frac{t_E + t_A}{2} \quad \text{für Rohrströmungen} \quad (1-7)$$

Zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten sind folgende dimensionslose Kenngrößen von Bedeutung:

- Reynolds-Zahl $Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (1-8)$

- Prandl-Zahl $Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\eta \cdot cp}{\lambda} \quad (1-9)$

- Grashof-Zahl $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot |\Delta T|}{\nu^2} \quad (1-10)$

- Peclet-Zahl $Pe = \frac{w \cdot L \cdot cp \cdot \rho}{\lambda} \quad (1-11)$

- Rayleigh-Zahl $Ra = Gr \cdot Pr \quad (1-12)$

Die dimensionslose Form des Wärmeübergangskoeffizienten trägt die Bezeichnung Nußelt-Zahl.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (1-13)$$

Alle Berechnungsgleichungen für den Wärmeübergang gelten nur für stationäre d.h. zeitlich unabhängige Strömungen und für mittlere – nicht örtliche – Nußelt- Zahlen.

2 Konvektiver Wärmeübergang bei freier Strömung

Beim Vorhandensein von Temperaturdifferenzen ergeben sich immer Strömungen durch die Dichtedifferenzen. Im allgemeinen sinkt die Dichte mit steigender Temperatur, erwärmte Fluidelemente steigen dann auf, kalte sinken ab. Strömungen, die durch schwerkraftbedingte Auftriebs- bzw. Abtriebskräfte verursacht werden, nennt man freie Konvektion oder Naturkonvektion.

Sie ist eine in der Technik und in der Natur häufig anzutreffende Strömungsform und gewinnt wachsende Bedeutung für technische Probleme, wie z.B. für die Sicherheit von kerntechnischen Anlagen, die Wärmeisolation oder Wärmespeicherung, den Wärmetransport in geschlossenen und offenen Heizungs- oder Klimasystemen oder den Schadstofftransport in der Atmosphäre.

Weitere Anwendungsbereiche /3/ findet man in der Heizungs- und Klimatechnik, wo das Problem der Raumtemperierung durch Wand-, Boden- und Rippenheizung eng mit der freien Konvektion verknüpft ist.

In der Energietechnik wird die freie Konvektion beispielsweise in Kühltürmen eingesetzt, um die Abwärme von Kraftwerken an die Umgebungsluft abzuführen.

In Kreisläufen von Solarkollektoren ist der Wärmespeicher so angeordnet, daß der Kreislauf ausschließlich durch freie Konvektion angetrieben wird.

Die Ausbreitung von Abluft oder Abgasen aus Kaminen sowie die Ausbreitung von Kühl- und Abwasser in fließenden oder stehenden Gewässern führen durch ihre Temperaturunterschiede dazu bei, daß die freie Konvektion auch dort einen großen Einfluß hat.

Beispiele aus der Natur findet man in der Meteorologie und Geophysik wieder.

Die Bewegung der Luft in der Atmosphäre oder die Sonneneinstrahlung, die die Erdoberfläche erwärmt und aufwärts gerichtet Strömungen erzeugt, sind massiv durch freie Konvektion bestimmt.

Ausgehend von einem festen Kern, ist das innere unserer Erde flüssig und besitzt wiederum an der Oberfläche eine feste Kruste. Über den flüssigen Teil liegen große Temperaturdifferenzen an, so daß auch hier freie Konvektion auftritt.

Das sind nur einige Anwendungsbeispiele, doch sie zeigen deutlich, daß das Spektrum der freien Konvektion sehr vielseitig ist und unterschiedliche Formen besitzt.

Wie in der Einleitung schon beschrieben, wird häufig die Nußelt-Zahl Nu zur Darstellung des Wärmeübergangs benutzt. Der mittlere dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient wird durch die Gleichungen in der Form

$$Nu = f_2(Gr, Pr, L_a/L) \quad (2-0)$$

mit L_a/L als Verhältnis von geometrische Kenngrößen

$$\text{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (2-1)$$

und für Flüssigkeiten:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot (T_o - T_\infty)}{\nu^2} \quad (2-2a)$$

oder für ideale Gase mit $\beta = 1/T_\infty$:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot L^3 \cdot (T_o - T_\infty)}{\nu^2 \cdot T_\infty} \quad (2-2b)$$

beschrieben, wobei die Grashofzahl eine Art Reynoldszahl der freien Konvektion darstellt.

Den gesuchten Wärmeübergangskoeffizienten erhält man aus der mittleren Nußelt-Zahl zu:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{L} \quad (2-3)$$

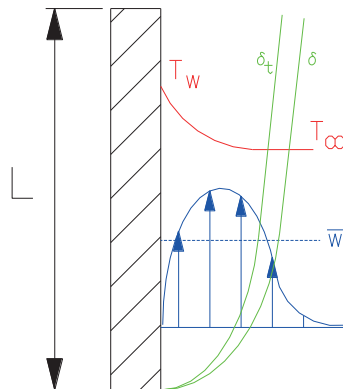
Die Funktion f_2 hat unterschiedliche Gleichungen und kann nur in seltenen Fällen theoretisch ermittelt werden, sie muß i. allg. durch Experimente bestimmt werden und hängt von der Form der Heiz- und Kühlfläche (eben oder gewölbt; glatt, rauh oder berippt) ab.

Alle nachfolgenden Gebrauchsformeln gelten unter Voraussetzung konstanter Werte der Umgebungstemperatur t_u , der Oberflächentemperatur t_o sowie der Stoffwerte, die für die Bezugstemperatur t_m zu bilden sind. Dabei werden die Oberflächenbeschaffenheit wie Rauigkeit, Welligkeit oder scharfkantige, abgerundete Plattenkanten sowie Reibungseinflüsse nicht berücksichtigt.

- Grenzschicht

Wird z.B. eine senkrecht stehende Platte von der Höhe L beheizt, sind die wandnahen Fluidelemente leichter als die weiter entfernt liegenden und es besteht ein statischer Druckunterschied, der eine aufwärts gerichtete Strömung bewirkt. Es entsteht eine Plattengrenzschicht, die an der Plattenunterkante beginnt und deren Dicke nach oben hin zunimmt.

Ebenso gut lassen sich diese Betrachtungen auch für gekühlte Wände anstellen, mit dem einzigen Unterschied, dass dann die Grenzschicht an der Oberkante der Platte beginnt und die Strömung abwärts gerichtet ist.



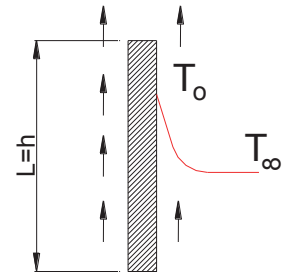
Auftriebsströmung einer senkrechten Platte

Das Geschwindigkeitsprofil zeigt, daß die Geschwindigkeit an der Plattenoberfläche gleich null ist. Mit zunehmender Entfernung steigt die Geschwindigkeit auf ein Höchstmaß an und fällt bei genügendem Abstand zur Platte wieder auf null ab. Das dazugehörige Temperaturprofil fällt mit zunehmender Entfernung zur Platte von der Plattentemperatur T_w auf die Umgebungstemperatur T_∞ ab.

2.1 Wärmeübergang an senkrechten Wänden nach VDI Wärmeatlas 1974 /11/ Bearbeiter des Abschnitts Ga: Dr.-Ing. V. Gnielinski, Karlsruhe

- Rechnerische Erfassung des Wärmeübergangskoeffizienten

senkrechte Wand : $L = h = \text{Wandhöhe}$



senkrechte
Wand

$$Re_{frei} = \sqrt{\frac{Gr}{2,5}} \quad (2-5)$$

$$Re = Re_{frei} \quad (2-6)$$

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (2-7)$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (2-8)$$

$$Nu_0 = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad (2-9)$$

$$Nu = Nu_0 \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (2-10)$$

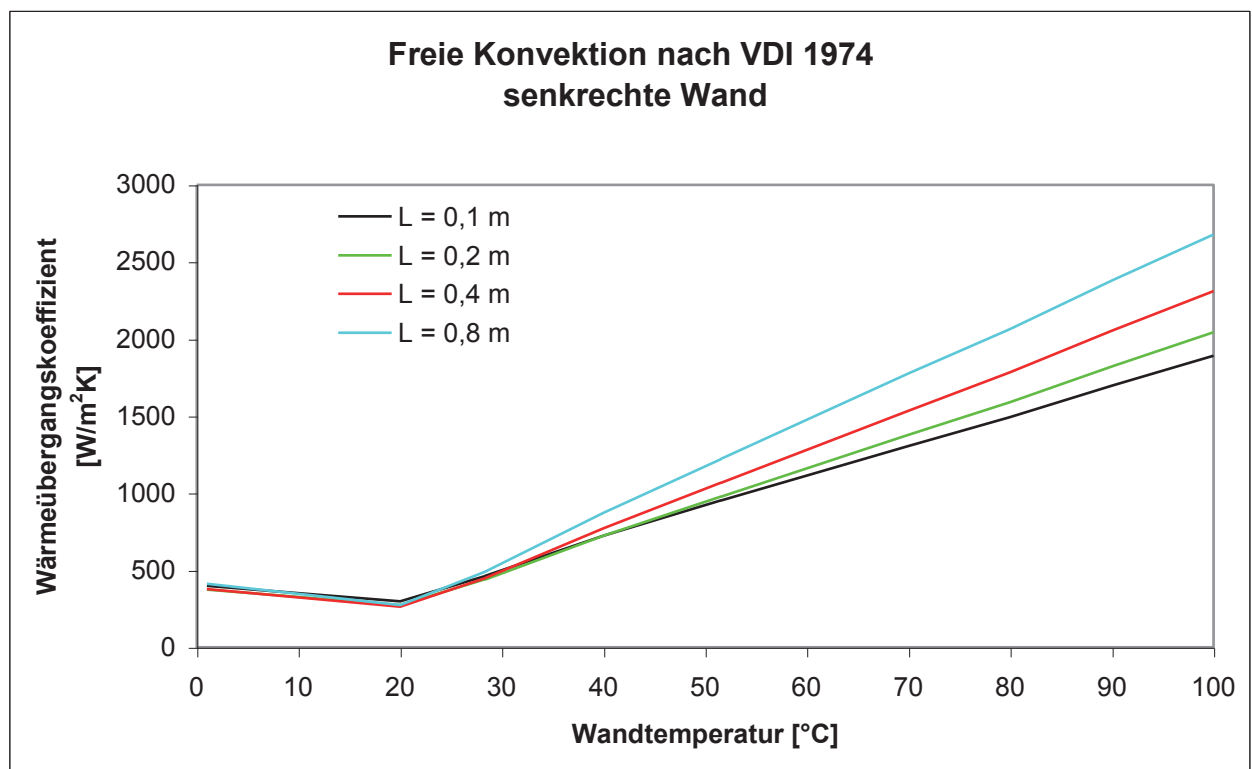
Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α nach (2-3)

- Graphische Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_O (Wandtemperatur)

Fluid: Wasser, bei 1bar

Umgebungstemperatur: 22°C

		L = 0,1 m	L = 0,2 m	L = 0,4 m	L = 0,8 m
Wandtemperatur	Pr	α	α	α	α
[°C]		[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
1	9,02	399,122	375,714	379,175	411,251
20	6,82	297,914	272,086	263,784	274,646
28,3	6,11	460,939	438,792	447,553	488,325
28,4	6,10	463,652	441,638	450,752	492,085
40	5,30	724,947	723,448	773,245	873,512
51,5	4,66	951,102	975,272	1065,884	1220,417
51,6	4,65	953,022	977,430	1068,400	1223,396
70	3,86	1307,330	1378,552	1536,172	1775,544
80	3,51	1493,468	1590,669	1783,032	2065,050
90	3,22	1696,957	1823,219	2053,442	2381,379
100	2,95	1890,476	2044,320	2309,456	2679,057



Im Bereich Wandtemperatur (Oberflächentemperatur) < Umgebungstemperatur sinkt die Wärmeübergangszahl mit zunehmender Wandtemperatur.

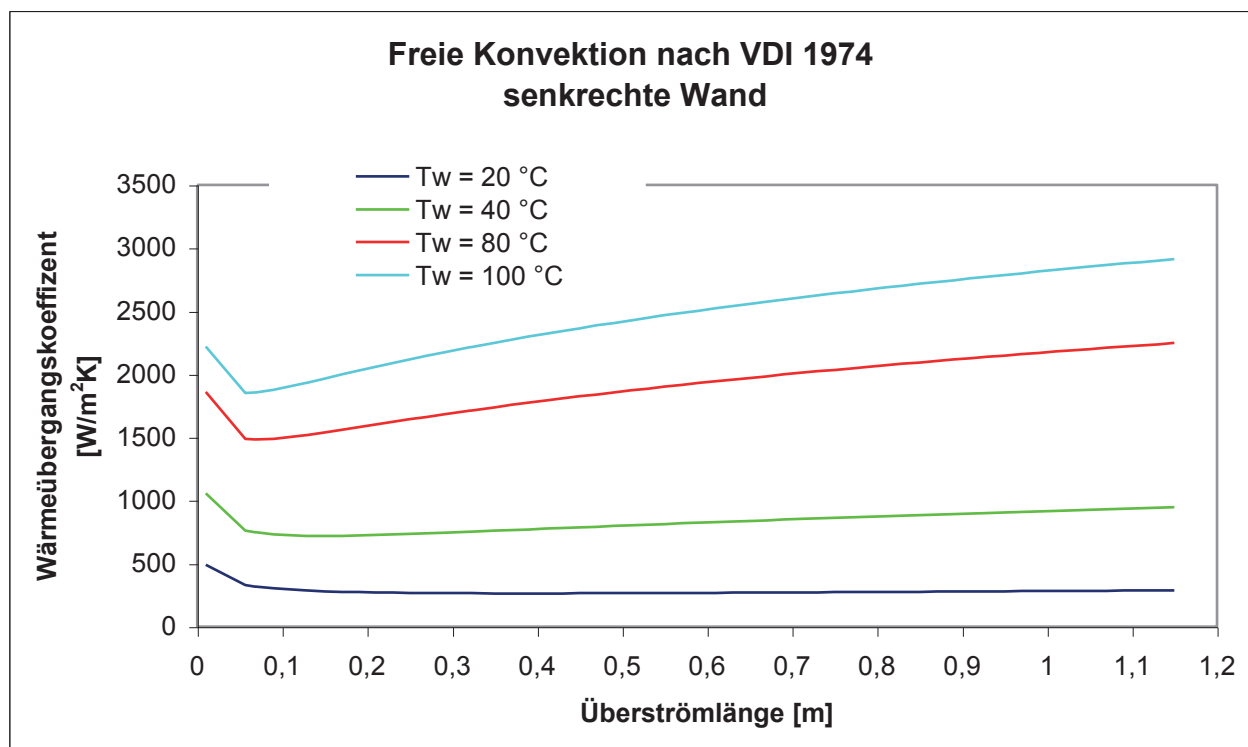
Im Bereich Wandtemperatur (Oberflächentemperatur) > Umgebungstemperatur steigt die Wärmeübergangszahl mit zunehmender Wandtemperatur. Durch Verdoppelung der Wandtemperatur steigt die Wärmeübergangszahl im Durchschnitt um das 2,38 fache.

- Graphische Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Überströmlänge L

Fluid: Wasser, bei 1bar

Umgebungstemperatur: 22°C

Pr =	6,818	5,302	3,51	2,954
Überströmlänge	$T_w = 20\text{ °C}$	$T_w = 40\text{ °C}$	$T_w = 80\text{ °C}$	$T_w = 100\text{ °C}$
L	α	α	α	α
[m]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
0,1	303,2	729,6	1487,3	1877,3
0,2	270,9	725,3	1601,2	2059,4
0,3	265,3	743,8	1682,3	2173,1
0,4	263,8	776,0	1791,6	2320,9
0,5	265,4	802,8	1871,9	2427,3
0,6	268,1	828,4	1944,3	2522,3
0,7	271,4	852,7	2010,3	2608,1
0,8	275,0	875,8	2070,9	2686,6
0,9	278,8	897,5	2127,1	2759,0
1,0	282,7	918,2	2179,4	2826,2
1,1	285,8	934,0	2219,0	2876,9
1,15	288,2	945,4	2247,4	2913,2



Mit zunehmender Überströmlänge nimmt die Wärmeübergangszahl zu, wobei der Einfluß der Überströmlänge bei höheren Wandtemperaturen größer ist.

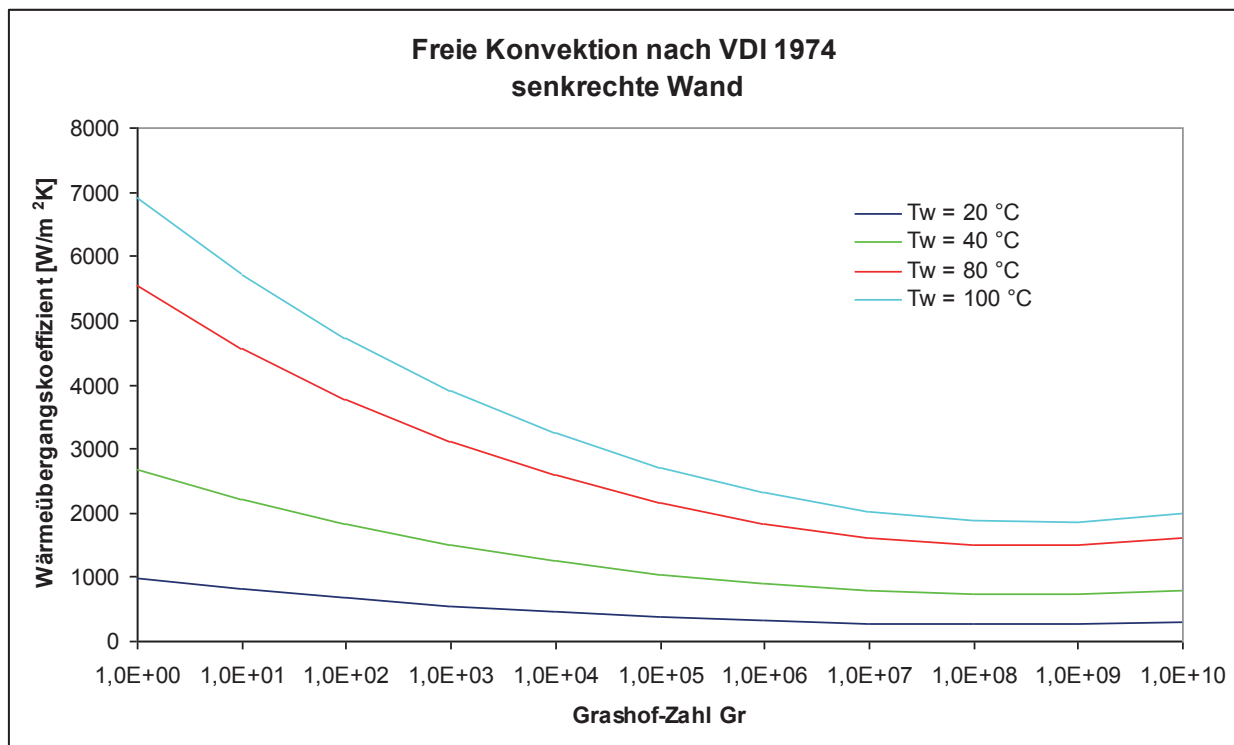
Durch Verdoppelung der Überströmlänge steigt die Wärmeübergangszahl im Durchschnitt um das 1,12 fache.

- Graphische Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Grashof-Zahl Gr
- Konstante Temperatur

Fluid: Wasser, bei 1bar

Umgebungstemperatur: 22°C

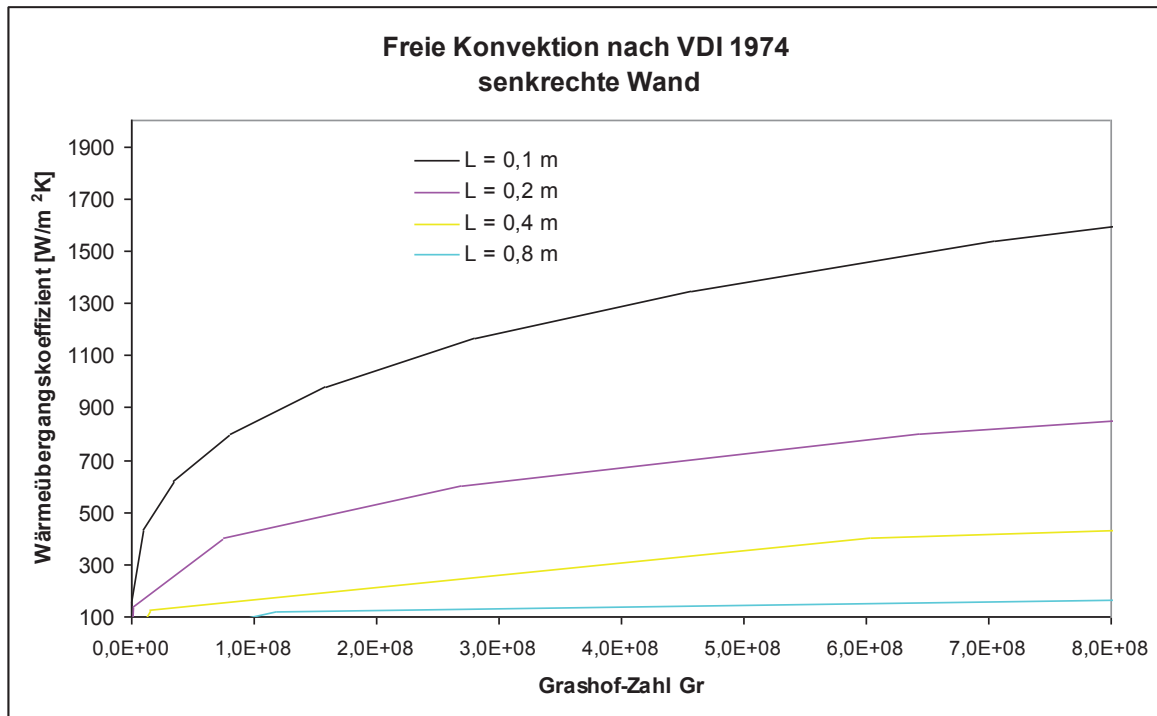
Pr =	6,818	5,302	3,51	2,954
	Tw = 20 °C	Tw = 40 °C	Tw = 80 °C	Tw = 100 °C
Grashof-Zahl	α	α	α	α
Gr	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
1,0E+00	981,945	2674,377	5530,938	6920,911
1,0E+01	810,805	2208,323	4567,348	5715,359
1,0E+02	669,847	1824,502	3773,966	4722,887
1,0E+03	554,098	1509,386	3122,883	3908,613
1,0E+04	459,731	1252,569	2592,647	3245,729
1,0E+05	384,113	1046,879	2168,395	2715,606
1,0E+06	325,998	888,855	1842,646	2308,647
1,0E+07	285,812	779,418	1616,258	2025,252
1,0E+08	265,618	723,651	1497,550	1874,493
1,0E+09	268,041	727,906	1496,565	1867,157
1,0E+10	294,415	795,057	1616,501	2005,776



Der Wärmeübergangskoeffizient α und somit der Wärmeübergang sinkt bei konstanten Temperaturen (Oberflächentemperatur, Umgebungstemperatur) mit zunehmender Erhöhung der Grashof-Zahl, wobei der Einfluß bei höheren Temperaturen größer ist.

Bei konstanter Überströmlänge steigt hingegen der Wärmeübergangskoeffizient α mit zunehmender Erhöhung der Grashof-Zahl.

- Konstante Überströmlänge



Umgeb. = 0°C		L = 0,1 m		L = 0,2 m	
Wandtemperatur	Pr	Grashof-Zahl	α	Grashof-Zahl	α
[°C]		Gr	[W/m²K]	Gr	[W/m²K]
0	13,4	-	-	-	-
10	11,2	233530,99	159,25	1868247,922	138,23
20	9,4	9438073,39	430,86	75504587,16	401,60
30	8,1	33651108	619,44	269208864,3	600,18
40	7,0	80464079,9	799,54	643712639,5	797,16
50	6,1	159061332	980,18	1272490655	999,12
60	5,4	280355174	1162,46	2242841392	1205,77
70	4,8	456947590	1346,70	3655580721	1416,41
80	4,3	705109894	1536,81	5640879149	1634,59
90	3,9	1039539933	1728,08	8316319467	1854,68
100	3,6	1445692958	1902,74	11565543667	2055,60

Umgeb. = 0°C		L = 0,4 m		L = 0,8 m	
Wandtemperatur	Pr	Grashof-Zahl	α	Grashof-Zahl	α
[°C]		Gr	[W/m²K]	Gr	[W/m²K]
0	13,4	-	-	-	-
10	11,2	14945983,4	123,88	119567867	117,10
20	9,4	604036697	400,50	4832293578	429,81
30	8,1	2153670914	625,24	17229367313	695,83
40	7,0	5149701116	853,38	41197608927	968,01
50	6,1	1,018E+10	1089,59	81439401893	1249,96
60	5,4	1,7943E+10	1332,25	1,43542E+11	1538,96
70	4,8	2,9245E+10	1579,75	2,33957E+11	1832,66
80	4,3	4,5127E+10	1835,70	3,61016E+11	2135,09
90	3,9	6,6531E+10	2093,32	5,32244E+11	2438,18
100	3,6	9,2524E+10	2327,31	7,40195E+11	2711,41

- Berechnung der Wärmeübergangszahl bei Luft

Umgebungstemperatur t_a	22°C								
Fluid	Luft								
Beispiel	a	b	c	d	e	f	g	h	Einheit
Wandtemperatur t_w	20	20	20	20	20	40	80	160	°C
Überströmlänge L	0,5	1	2	4	8	2	2	2	m
Wärmeleitfähigkeit λ	0,0257	0,0257	0,0257	0,0257	0,0257	0,0264	0,0279	0,03	W/mK
kinetische Viskosität $10^{-5} \nu$	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,64	1,83	2,25	m ² /s
Prandtl-Zahl Pr	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,714	0,711	0,708	-
Grashof-Zahl Gr	3,5E+07	2,7E+08	2,2E+09	1,7E+10	1,4E+11	1,7E+10	4,5E+10	7,2E+10	-
Reynolds-Zahl Re	3,7E+03	1,0E+04	2,9E+04	8,4E+04	2,3E+05	8,4E+04	1,4E+05	1,6E+05	-
Nußelt-Zahl Nu	43,54	81,46	158,86	323,07	681,25	322,83	451,59	530,8	-
Wärmeübergangszahl α	2,241	2,096	2,044	2,078	2,191	4,273	6,311	8,163	W/m ² K

Durch Verdoppelung der Überströmlänge nimmt die Wärmeübergangszahl um den Faktor 1,1 zu.

(Beispiele b, c, d und e)

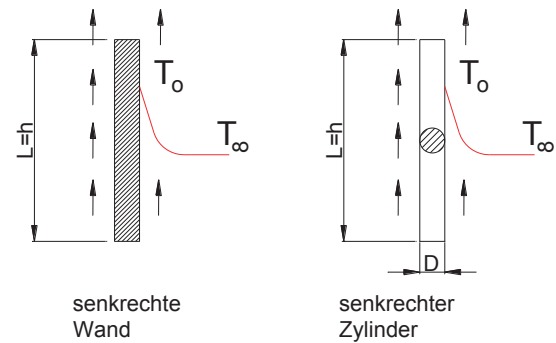
Wie die Beispiele e, f, g und h zeigen, nimmt die Wärmeübergangszahl durch Verdoppelung der Wandtemperatur um den Faktor 1,57 zu.

2.2 Wärmeübergang an vertikalen Flächen und Zylindern nach VDI Wärmeatlas 1997 /12/

Bearbeiter des Abschnitts Fa: Dr.-Ing. H. Klan, Darmstadt

- Rechnerische Erfassung des Wärmeübergangskoeffizienten

$L = h =$ Wandhöhe, Zylinderhöhe



senkrechte Wand:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2-11)$$

$$Nu = \left[0,825 + 0,387 \cdot (Ra \cdot f_1)^{\frac{1}{6}} \right]^2 \quad (2-12) \text{ angegeben von Churchill und Chu}$$

mit

$$f_1 = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{16}{9}} \quad (2-13)$$

senkrechter Zylinder:

$$Nu = Nu_{Wand} + 0,87 \cdot \frac{h}{D} \quad (2-14)$$

mit einer gleich hohen senkrechten Wand und das Verhältnis zwischen Höhe h und Durchmesser D

Gültigkeitsbereich: $Pr > 0,001$
 $10^{-10} \leq Ra \leq 10^{12}$

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α nach (2-3)