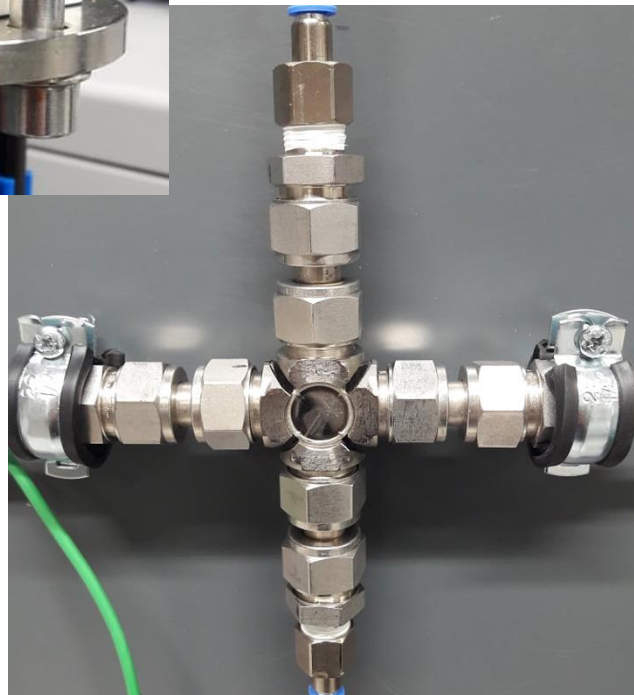


Themengebiet: **Wärmetransport**

Mikrowärmetauscher

Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten k

Bei verschiedenen Stromführungen



Verzeichnis der verwendeten Symbole

k	Wärmedurchgangskoeffizient
\dot{Q}	Wärmestrom
A	Wärmeübertragungsfläche
s	Wanddicke
\dot{m}	Massestrom
c_p	Spezifische Wärmekapazität von Wasser, bei konstantem Druck
n_f	Anzahl der Wärmeübertragerplättchen
n_k	Anzahl der Kanäle eines Wärmeübertragerplättchens
U	Benetzter Umfang eines Rohrs oder Kanals
l	Länge
a	Kanalbreite (Mikrowärmeübertrager)
h	Kanalhöhe (MikroWÜ)
\dot{V}	Volumenstrom
α	Wärmeübergangskoeffizient
λ	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient
ρ	Dichte
ϑ	Temperatur [°C]
$\Delta\vartheta$	Logarithmische Mitteltemperaturdifferenz
$\bar{\vartheta}_l$	Mittlere Temperaturdifferenz
$\Delta\vartheta_{wärmere}$	Größere Differenz zwischen Eingangs- /Ausgangstemperatur Von Kalt-/Warmwasser
$\Delta\vartheta_{kältere}$	Kleinere Differenz zwischen Eingangs- /Ausgangstemperatur Von Kalt-/Warmwasser
A	Ausgangsgröße
E	Eingangsgröße
G	Grenzschicht
a	Außen
i	Innen
w	Wand
1	Warmwasserstrom
2	Kaltwasserstrom

3Ziel des Versuches

Im Rahmen des Praktikumsversuches gilt es den Wärmetransport anhand eines Mikrowärmetauschers zu untersuchen. In diesem Zusammenhang soll der Wärmedurchgangskoeffizient k experimentell ermittelt werden. Dabei sollen die Einflussfaktoren Betriebsart, Fluiddurchsatz und Material diskutiert werden. Des Weiteren ist ein Vergleich zwischen einem Mikrowärmetauscher und einem Doppelrohr-Wärmetauscher Bestandteil dieses Versuches

Einleitung

Das Phänomen Wärmetransport ist nicht nur im alltäglichen Leben von großer Bedeutung. So überträgt beispielsweise ein Heizkörper Wärme auf die umliegenden Luftteilchen, der heiße Kaffee auf den sich in der Tasse befindenden Löffel oder ein Topf auf dem Herd auf dessen Inhalt. Auch der Golfstrom spiegelt den Wärmetransport wider. Auch bei technischen Prozessen wird der Wärmetransport gezielt eingesetzt. In der chemischen Industrie sind z.B. Stoffströme abzukühlen oder aufzuwärmen, damit eine Weiterverarbeitung erfolgen kann. Die Gestaltung der Heiz- und Kühlprozesse hat einen großen Einfluss auf die Energiewirtschaft und stellt somit einen wichtigen Kostenfaktor dar.

Wärmeübertragung bezeichnet den durch Temperaturdifferenzen verursachten Transport von Energie über eine Systemgrenze. Dabei unterscheidet man drei verschiedene Mechanismen: die Wärmeleitung, die Wärmestrahlung und die Konvektion.

- 1) Wärmeleitung: erfolgt aufgrund eines Temperaturgradienten in Festkörpern oder Fluiden
- 2) Wärmestrahlung: Wärmetransport ohne stofflichen Träger
- 3) Konvektion: Wärmetransport durch bewegte flüssige oder gasförmige Fluide

In der Technik wird für den Wärmetransport häufig ein sogenannter Wärmeübertrager eingesetzt. Je nach Einsatzgebiet variiert die verwendete Bauform. Der Doppelrohrwärmetauscher zählt zu den einfachsten Wärmetauschern. Zu den leistungsfähigeren Exemplaren gehören z.B. der Rohrbündel- und der Plattenwärmetauscher. Die Mikrowärmeübertrager sind eine Weiterentwicklung des Kompaktwärmetauschers, eine Sonderform der Plattenwärmetauscher. Ihre Abmessungen liegen im Mikrometerbereich.

Aufgrund dessen, dass in den Mikrowärmetauschern ein kontinuierlicher Wärmeübergang erfolgt, lassen sie sich den sogenannten Rekuperatoren zuordnen.

Man unterscheidet drei Betriebsarten: Gleichstrom, Gegenstrom und Kreuzstrom.

Theoretische Grundlagen

Wärmedurchgang

Der Wärmedurchgang bezeichnet die Wärmeübertragung eines Fluids in ein anderes Fluid durch eine Wand. Es handelt sich somit um einen Transport durch mehrere Schichten. Dabei gilt gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, dass Wärme immer vom höheren Temperaturniveau auf das niedrigere übertragen wird. Jeder Wärmedurchgang ist durch drei Teilschritte charakterisiert:

1. Wärmetransport von der wärmeren Phase über die laminare Grenzschicht an die Wand (Konvektion)
2. Wärmetransport durch die Wand (Wärmeleitung)
3. Wärmetransport von der Wand über die laminare Grenzschicht auf die kältere Phase (Konvektion)

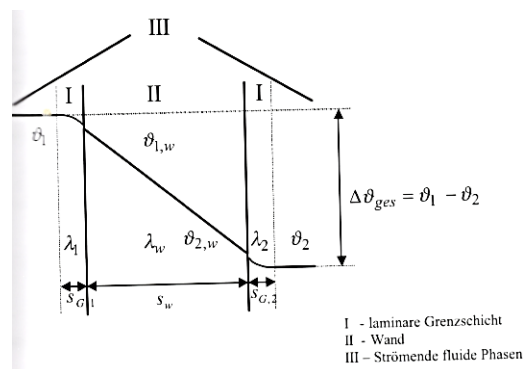


Abbildung 1: Darstellung Wärmedurchgang an einer Wand¹

Der Wärmestrom \dot{Q}_w , der durch die Wand geleitet wird, ergibt sich wie folgt:

$$\dot{Q}_w = A \cdot \frac{\lambda_w}{s_w} \cdot (\vartheta_{1,w} - \vartheta_{2,w}) \quad (1)$$

Er ist somit als Produkt der Wärmeübertragungsfläche A , dem Leitwert und der Triebkraft definiert. Der Leitwert ergibt sich als Quotient aus dem Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ_w und der Schichtdicke s_w der Wand. Die Temperaturdifferenz zwischen beiden fluiden Phasen ($\vartheta_{1,w} - \vartheta_{2,w}$) spiegelt die Triebkraft wider.

¹ Georges,D: Versuchsanleitung „Wärmetransport“

Der Wärmeübergang zwischen einem Fluid und einer Wand ist durch viele Faktoren beeinflusst. Einen der Haupteinflussfaktoren stellt die Fluidströmung dar. Man unterscheidet zwischen laminarer und turbulenter Strömung.

Charakterisiert wird die Strömungsart durch die Reynolds-Zahl. Im Gegensatz zur turbulenten Strömung zeichnet sich die laminare Strömung durch langsamere Strömungsgeschwindigkeiten und parallele Strömungsbahnen aus. Die Strömungsart ist ausschlaggebend für die Grenzschichtausbildung. Liegt eine laminare Strömung vor, so ist die Grenzschicht stärker ausgeprägt. Für den Wärmeübergang zwischen Fluid und Wand durch die laminare Grenzschicht s_G gilt:

$$\dot{Q}_1 = A \cdot \frac{\lambda_1}{s_{G,1}} \cdot (\vartheta_{1,w} - \vartheta_{2,w}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_2 = A \cdot \frac{\lambda_2}{s_{G,2}} \cdot (\vartheta_{1,w} - \vartheta_{2,w}) \quad (3)$$

Der Koeffizient $\frac{\lambda}{s_G}$ repräsentiert den Wärmeübergangskoeffizienten α , welcher sowohl von der Strömungskennzahl als auch von Stoffwerten abhängig ist. Dieser kann sowohl experimentell bestimmt werden als auch mithilfe von Ähnlichkeitskennzahlen berechnet werden.

Für den Gesamtwärmedurchgang im stationären Zustand gilt, unter der Annahme, dass kein Wärmeverlust auftritt:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_w = \dot{Q}_L = \dot{Q} \quad (4)$$

Die Wärmeströme der fluiden Phasen lassen sich wie folgt berechnen:

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta\vartheta_i \quad (5)$$

Aus den bisherigen Gleichungen und unter der Bedingung:

$$(\vartheta_1 - \vartheta_2) = (\vartheta_1 - \vartheta_{1,w}) + (\vartheta_{1,w} - \vartheta_{2,w}) + (\vartheta_{2,w} - \vartheta_2)$$

ergibt sich für den übertragenen Gesamtwärmestrom:

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2}} (\vartheta_1 - \vartheta_2) = A \cdot k \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (6)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient k entspricht dabei dem Wärmestrom, der eine 1 m^2 große Fläche bei einer Temperaturdifferenz von 1 K zwischen Innen- und Außenluft durchströmt.

Die Wärmeübertragungsfläche A eines Mikrowärmetauschers ergibt sich aus:

$$A = n_{f,pas} \cdot n_K \cdot U_k \cdot l_k \quad (7)$$

Die treibende Temperaturdifferenz und die Betriebsart stehen in direkter Abhängigkeit. Die Einführung der logarithmischen Mitteltemperaturdifferenz $\Delta\vartheta_m$ soll die verschiedenen Triebkräfte innerhalb des Rohres ausgleichen und ist wie folgt definiert:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{w\u00e4rmere} - \Delta\vartheta_{k\u00e4ltere}}{\ln \frac{\Delta\vartheta_{w\u00e4rmere}}{\Delta\vartheta_{k\u00e4ltere}}} \quad (8)$$

$\Delta\vartheta_{w\u00e4rmere}$ und $\Delta\vartheta_{k\u00e4ltere}$ repr\u00e4sentieren dabei die Temperaturdifferenzen an beiden Seiten des W\u00e4rmetauschers. (Ausgang und Eingang)

Befindet sich die Anlage im Kreuzstrombetrieb, so gilt:

$$\Delta\vartheta_{m,Kreuz} = F \cdot \Delta\vartheta_{m,Gegen} \quad (9)$$

Der Faktor F bezeichnet hierbei einen Korrekturfaktor, welcher sich als Funktion zweier dimensionsloser Temperaturdifferenzen R und P ergibt:

$$R = \frac{\vartheta_1^E - \vartheta_1^A}{\vartheta_2^A - \vartheta_2^E} \quad (10)$$

$$P = \frac{\vartheta_2^A - \vartheta_2^E}{\vartheta_1^E - \vartheta_1^A} \quad (11)$$

Der Korrekturfaktor F ergibt sich aus:

$$F = 1 - F' \quad (12)$$

F' erh\u00e4lt man durch folgende N\u00e4herungsgleichung $F' = f(R', P')$:

$$F' = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^4 \left[a(i, k) \cdot (1 - \Delta\vartheta_{m,dim})^k \cdot \sin \left(2 \cdot i \cdot \arctan \frac{R'}{P'} \right) \right], \quad (13)$$

wobei

$$\Delta\vartheta_{m,dim} = \frac{\Delta\vartheta_{m,Gegen}}{\vartheta_1^E - \vartheta_2^E} \quad (14)$$

$$R' = \frac{\vartheta_1^E - \vartheta_1^A}{\vartheta_1^E - \vartheta_2^E} \quad (15)$$

$$P' = \frac{\vartheta_2^A - \vartheta_2^E}{\vartheta_1^E - \vartheta_2^E} \quad (16)$$

Die Konstanten $a_{i,k}$ können folgender Tabelle entnommen werden:

$a_{i,k}$	i=1	2	3	4
k=1	0,0669	0,0	0,0395	0,0
2	-0,278	0,0	-0,22	0,0
3	1,11	0,0	0,454	0,0
4	0,136	0,0	-0,258	0,0

Unter Einbeziehung der logarithmischen Mitteltemperaturdifferenz lässt sich der maximale Wärmestrom wie folgt berechnen²:

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta\vartheta_m \quad (17)$$

Aufgabenstellung

Vorgegeben sind:

- ein Mikrowärmetauscher Bauart IM Mainz aus Edelstahl, Gleich- und Gegenstrombetrieb
- ein Mikrowärmetauscher Bauart FZ Karlsruhe aus Edelstahl, Kreuzstrombetrieb
- Wasser als Wärmeübertragungsflüssigkeit

	MWT1 IM Mainz	MWT2 FZ Karlsruhe
$n_{f,ges}$	20	50
$n_{f,pas}$	10	25
n_k	34	34
a	300 μm	200 μm
h	240 μm	100 μm
l	20 mm	10 mm
s_w	160 μm	200 μm
λ	18 W/mK (Edelstahl 1.4571)	15 W/mK (Edelstahl 1.4301)

² Georges,D: Versuchsanleitung „Wärmetransport“



1. Erstellen Sie für die graue Pumpe ein Diagramm, in dem der Volumenstrom in Abhängigkeit von der eingestellten Frequenz dargestellt wird!
2. Erstellen Sie für den vorliegenden Versuchsaufbau ein R/I-Fließschema!
3. Bestimmen Sie die Ein- und Austrittstemperaturen für den Kalt- und Warmwasserstrom für den MWT1 (sowohl im Gleich- als auch im Gegenstrombetrieb) und für den MWT2! Dabei gelten folgende Bedingungen:

A MWT1

Gleichstrom

1)	$T_{Thermostat} = 40\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 57\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 57\text{ l/h}$
2)	$T_{Thermostat} = 40\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 78\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 78\text{ l/h}$
3)	$T_{Thermostat} = 50\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 57\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 57\text{ l/h}$

Gegenstrom

4)	$T_{Thermostat} = 40\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 57\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 57\text{ l/h}$
5)	$T_{Thermostat} = 40\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 78\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 78\text{ l/h}$
6)	$T_{Thermostat} = 50\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 57\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 57\text{ l/h}$

B MWT2

Kreuzstrom

1)	$T_{Thermostat} = 40\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 30\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 30\text{ l/h}$
2)	$T_{Thermostat} = 50\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 30\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 30\text{ l/h}$
3)	$T_{Thermostat} = 50\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 78\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 78\text{ l/h}$
4)	$T_{Thermostat} = 50\text{ °C}$	$T_{Kryostat} = 5\text{ °C}$	$\dot{V}_1 = 30\text{ l/h}$	$\dot{V}_2 = 78\text{ l/h}$

Hinweis: Die Pumpen sind wie folgt einzustellen, um die geforderten Volumenströme zu erhalten:

Volumenstrom	Grüne Pumpe	Graue Pumpe
30 l/h	25 %	Drehzahl= 210
57 l/h	30 %	Drehzahl = 398
78 l/h	35 %	Drehzahl = 545

4. Berechnen Sie an Hand der experimentellen Werte für beide MWT mit den vorgegebenen Bedingungen die Wärmedurchgangskoeffizienten k !
5. Diskutieren Sie die ermittelten k -Werte unter folgenden Gesichtspunkten:
 - Betriebsart
 - Fluiddurchsatz (Strömungsart, Strömungsgeschwindigkeit)
6. Ein ähnlicher Versuch wurde vor einigen Jahren bereits an der FSU Jena durchgeführt, allerdings mit einem Doppelrohr-Wärmetauscher. Dabei ergaben sich die folgenden Messwerte:

k -Werte des Doppelrohrwärmeübertragers.

Apparat	Glaswärmeübertrager		Metallwärmeübertrager	
	Gleichstrom	Gegenstrom	Gleichstrom	Gegenstrom
\dot{V}_1 [L/h]	70	70	70	70
\dot{V}_2 [L/h]	120	120	120	120
$\Delta\vartheta_1$ [K]	4,0	4,1	8,4	8,8
$\Delta\vartheta_2$ [K]	3,2	3,4	6,7	7,0
Re_1 [-]	8237	8334	6982	6958
Re_2 [-]	2627	2736	2626	2629
k_{ber} [$W/m^2 K$]	698	703	2091	2069

Quelle: Chemie Ingenieur Technik (74)

- a) Vergleichen Sie die k -Werte des Doppelrohr-Wärmetauschers mit den von ihnen experimentell ermittelten k -Werten für die Mikrowärmetauscher! Welche Schlussfolgerung kann daraus gezogen werden?
- b) Diskutieren Sie die k -Werte des Doppelrohr-Wärmetauschers hinsichtlich des Materials!

Versuchsdurchführung

Mittels eines Thermostates und eines Kryostats soll das Konstanthalten der Eintrittstemperaturen des Warm- bzw. Kaltwassers gewährleistet werden. Die Temperatur des Warmwassers sollte dabei ca. 40 bzw. 50 °C und die des Kaltwassers ca. 15°C betragen. Mittels der Förderpumpen wird das Wasser dem Kreislauf zugeführt. Über die entsprechenden Verteiler und Ventile erfolgt die Umleitung vom Kreislauf zum entsprechenden Wärmeübertrager und der entsprechenden Betriebsart.

Die gewünschten Volumenströme werden über die Drehzahlregelung der Förderpumpen eingestellt. Der Volumenstrom ergibt sich aus der eingestellten Frequenz.

Die Ein- und Austrittstemperaturen werden am Digitalthermometer, die Volumenströme am Durchflusssensor (Rotameter) abgelesen.

Auswertung

- ❖ Das Auslitern der Pumpe erfolgt wie folgt:
 - Befüllen Sie einen Eimer mit Wasser und hängen Sie beide Schläuche hinein
 - Stellen Sie die Pumpe auf die gewünschte Frequenz und lassen Sie die Pumpe einige Sekunden arbeiten
 - Setzen Sie den Schlauch der Out-Seite in ihr Messgefäß (z.B. Messzylinder) um und messen Sie die benötigte Zeit bis zum Erreichen des gewünschten Volumens
Wichtig: Die Pumpe darf währenddessen nicht ausgeschaltet werden
 - Setzen Sie den Schlauch zurück in den Eimer
 - Ermitteln Sie ausgehend von Ihrer gemessenen Zeit das geförderte Volumen pro Minute
 - Wiederholen Sie diesen Vorgang für verschiedene Frequenzen und erstellen Sie anhand Ihrer Daten ein Diagramm
- ❖ Die Erstellung des R/I-Fließschemas erfolgt mittels RI-CAD (alternativ: Wondershare, EdrawMax)
Anmerkung: Das R/I- Fließschema sollte alle erforderlichen Apparate und Maschinen beinhalten.
Außerdem sollte die Fließrichtung ersichtlich sein!
- ❖ Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten k erfolgt mittels folgenden Algorithmus:
 - Berechnung des Wärmeströme \dot{Q}_1 und \dot{Q}_2 mit Gleichung (5) in [J/s] bzw. [W] (jeweils die mittlere Temperatur des Warm- bzw. Kaltwassers einsetzen)
 - Berechnung des Wärmeverlustes $\Delta\dot{Q}$
 - Berechnung des Mittelwertes \dot{Q}_m aus \dot{Q}_1 und \dot{Q}_2
 - Berechnung der Wärmeaustauscherfläche nach Gleichung (7) in [m²]
 - Berechnung von $\Delta\vartheta_m$ nach Gleichung (8) in [K]
 - Berechnung von k mit dem Mittelwert für den Wärmestrom nach Gleichung (17) (nach k umstellen) in [W/m²K]

Hilfestellung für die Berechnungen:

$$1) \rho_i = \frac{1000}{4,0364 \cdot 10^{-6} \cdot (\vartheta_i + 5,252)^2 + 0,9996}$$

$$2) U_k = 2 \cdot (a + h)$$

Antestat

Für das Antestat sollten Sie folgende Aspekte kennen:

- Untersuchungsgegenstand dieses Praktikumsversuches
- Begrifflichkeiten
- Versuchsablauf
- vorherrschende Bedingung (Stichwort: In-/Stationarität)

Literatur

Brandner, J., Fischer M. et al., Improving the Efficiency of Micro Heat Exchangers and Reactors, Proceedings of the 4th Internat. Conference of Microreaction Technology, 1999, Atlanta, USA, pp. 244-249

VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 6. erweiterte Auflage 1991, VDI-Verlag

Incropera, F. P., De Witt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfers, 4th Edition, 1996, J. Wiley & Sons, New York

VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 4. Auflage 1984, VDI-Verlag, Abschnitt Ca

Bier, W., Keller, W et al., Gas to gas heat transfer in micro heat exchangers, Chemical Engineering and Processing, 1993, 32, pp. 33-43

Ondruschka, B., Scholz, P. et al., Mikrowärmeübertrager im chemischtechnischen Praktikum, Chemie Ingenieur Technik (74), 11/2002, WILEY-YCH Verlag, S.1577-1582