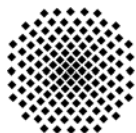


PRAKTIKUM

Versuch 9

Leistungsmessung an einem Wärmeübertrager im Gleich- und Gegenstrombetrieb





Praktikum

Versuch 9

Leistungsmessung an einem Wärmeübertrager im Gleich- und Gegenstrombetrieb

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines zu Wärmeübertragern	3
	1.1 Begriffsbestimmung	3
	1.2 Bauarten von Wärmeübertragern	3
	1.3 Anwendung	4
2	Berechnung von rekuperativen Wärmeübertragern	5
	2.1 Übertragener Wärmestrom	5
	2.2 Temperaturverläufe im Gleich- und Gegenstromwärmeübertrager	6
	2.3 Literatur	7
3	Versuchsbeschreibung	9
	3.1 Anlagenbeschreibung	9
	3.2 Messtechnik	11
4	Versuchsdurchführung	13
5	Auswertung	14

1 Allgemeines zu Wärmeübertragern

1.1 Begriffsbestimmung

In einem Wärmeübertrager wird Wärme von einem Fluid hoher Temperatur auf ein Fluid niedriger Temperatur übertragen. Es ergibt sich eine Temperaturänderung der Fluide im Wärmeübertrager, die für die jeweilige Bauart des Wärmeübertragers charakteristisch ist.

1.2 Bauarten von Wärmeübertragern

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten der technischen Realisierung von Wärmeübertragern. In rekuperativen Wärmeübertragern wird kontinuierlich Wärme von einem heißen Fluid an ein kaltes Fluid übertragen. Regenerative Wärmeübertrager werden diskontinuierlich betrieben, d.h. sie werden vom heißen Fluid aufgeheizt, anschließend geben sie die gespeicherte Wärme an das kalte Fluid ab. Von den gebräuchlichsten Bauarten der rekuperativen Wärmeübertrager werden nachfolgend die wichtigsten Eigenschaften beschrieben.

1.2.1 Doppelrohrwärmeübertrager

Der Doppelrohrwärmeübertrager ist durch seine einfache Bauart gekennzeichnet. In ihm strömt das eine Fluid im Innenrohr, das andere Fluid im Mantelraum. Zur Erhöhung des Wärmeübergangs kann das Innenrohr außen berippt werden. Bild 1 zeigt einen Doppelrohrwärmeübertrager im Gleichstrombetrieb.

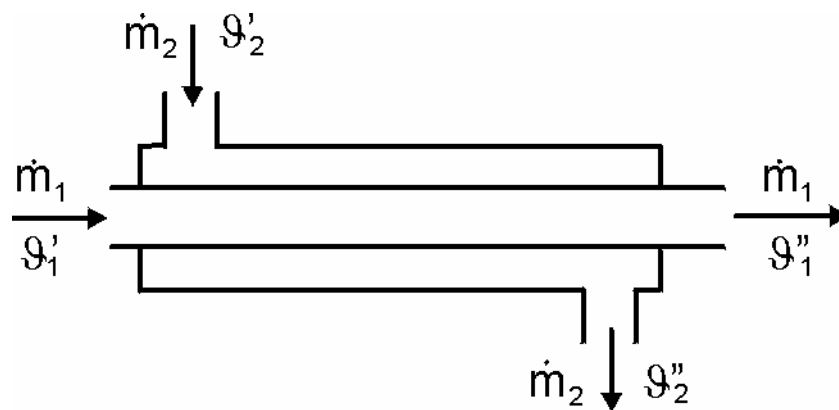


Bild 1: Doppelrohrwärmeübertrager im Gleichstrombetrieb

1.2.2 Rohrbündelwärmeübertrager

Bei dieser Bauart ist ein Rohrbündel in einem Mantelraum angeordnet. Das eine Fluid durchströmt das Rohrbündel, das andere Fluid umströmt das Rohrbündel im Mantelraum. Um die Anströmung des Rohrbündels und damit die Wärmeübertragung zu verbessern, werden oft Umlenkleche in den Mantelraum eingebaut. Bild 2 zeigt einen Rohrbündelwärmeübertrager ohne Umlenkleche im Gegenstrombetrieb.

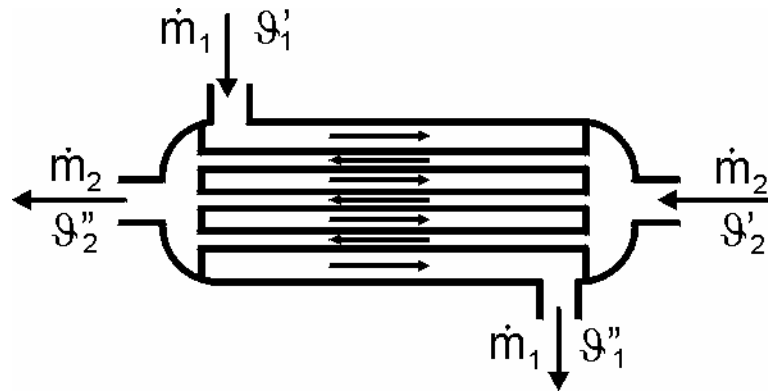


Bild 2: Rohrbündelwärmeübertrager im Gegenstrombetrieb

1.2.3 Kreuzstromwärmeübertrager

Beim Kreuzstromwärmeübertrager (Bsp.: Autokühler) ergeben sich auf den Austrittsseiten Temperaturverläufe, die sich über der Austrittsseite ändern, siehe Bild 3. Die Wärmeübergangskoeffizienten sind aufgrund der senkrechten Anströmung der Wärmeübertragerflächen größer als bei längsangeströmten Flächen in reinen Gleich- oder Gegenstromwärmeübertragern.

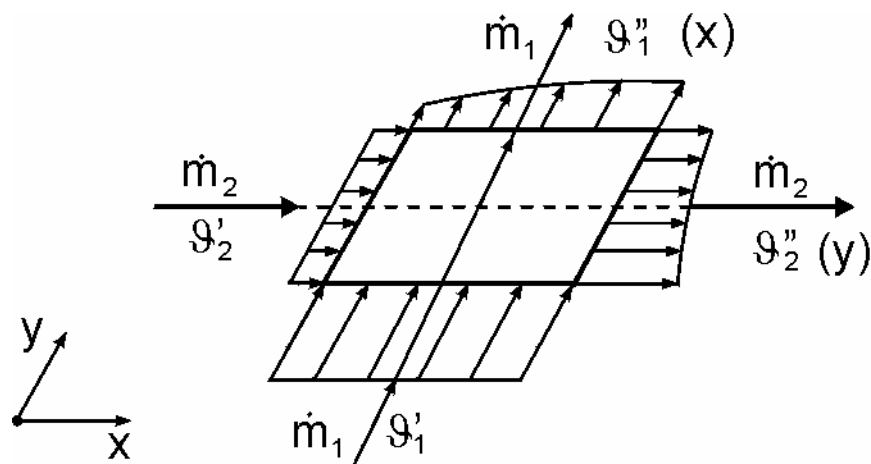


Bild 3: Temperaturverläufe beim Kreuzstromwärmeübertrager

1.3 Anwendung

Für Wärmeübertrager gibt es eine Fülle von verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten. Im Folgenden sind einige Beispiele aufgeführt:

- Abwärmenutzung z.B. in der chemischen Industrie, in der Lebensmittelindustrie etc.
- Als Verdampfer und Kondensatoren in Kälteanlagen und Wärmepumpen
- In der Kraftwerkstechnik als Dampferzeuger, Überhitzer und Zwischenüberhitzer.
- In der Heizungstechnik: Be- und Entladen von Wärmespeichern, Trennung von Solarkreislauf und Heizkreislauf einerseits und Brauchwasserkreislauf andererseits.
- Im Automobil (Kühler, Heizung).

2 Berechnung von rekuperativen Wärmeübertragern

2.1 Übertragener Wärmestrom

Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Es treten keine Wärmeverluste an die Umgebung auf (adiabater Wärmeübertrager).
- Temperaturverlauf und Geschwindigkeitsverlauf quer zur Strömung sind konstant (idealisierte Strömung).
- Der Wärmeübertrager arbeitet im stationären Betrieb.
- Es tritt keine Wärmeleitung in Längsrichtung der Trennwand der Fluide auf.
- Der Wärmedurchgangskoeffizient k ist über die gesamte Länge des Wärmeübertragers konstant. Oft kann mit einem über die Länge gemittelten k -Wert gerechnet werden.
- Die Stoffwerte der Fluide sind über der gesamten Länge des Wärmeübertragers konstant. Da sich die Stoffwerte mit der Temperatur ändern, rechnet man mit Stoffwerten, die für eine Bezugstemperatur gelten. Diese Bezugstemperatur wird durch arithmetische Mittelung der Ein- und Austrittstemperaturen gebildet:

$$\vartheta_{\text{Bezug}} = (\vartheta' + \vartheta'')/2$$
- Die Änderung kinetischer und potentieller Energie wird vernachlässigt.

Es werden folgende Bezeichnungen vereinbart:

- Index für das Fluid mit der höheren Temperatur: 1
- Index für das Fluid mit der niedrigeren Temperatur: 2
- Eintrittstemperatur: ϑ' ; Austrittstemperatur: ϑ''

Mit diesen Bezeichnungen ergibt sich aus der Wärmebilanz für den Gesamtapparat:
 Von Stoffstrom 1 abgegebener Wärmestrom (<0):

$$\dot{Q}_1 = -\dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta''_1)$$

Von Stoffstrom 2 aufgenommener Wärmestrom (>0):

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (\vartheta''_2 - \vartheta'_2)$$

Beim adiabaten Wärmeübertrager gilt: $|\dot{Q}_1| = |\dot{Q}_2| = \dot{Q}$

Für \dot{Q} gilt:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \theta_m$$

Dies ist die Grundgleichung zur Auslegung von Wärmeübertragern. Hierbei ist θ_m die mittlere treibende Temperaturdifferenz. Sie kann, wegen der nichtlinearen Temperaturverläufe im

Wärmeübertrager, in der Regel nicht durch die arithmetische Mittelung der Ein- und Austrittstemperaturen gebildet werden. Das Produkt $\dot{m} \cdot c_p$ wird als Wärmekapazitätsstrom \dot{W} definiert; er wurde früher als Wasserwert bezeichnet.

2.1.1 Maximal übertragbarer Wärmestrom

Der maximal übertragbare Wärmestrom beträgt $\dot{Q}_{id} = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta'_2)$. Er kann nur von einem idealen Wärmeübertrager (unendlich großer Gegenstromapparat) erreicht werden.

2.1.2 Wirkungsgrad und Gütegrad des Wärmeübertragers

Das Verhältnis $\varepsilon = \dot{Q}_{real} / \dot{Q}_{id}$ wird als der Wirkungsgrad des Wärmeübertragers bezeichnet [1]. Er gibt an, wie gut ein bestimmter Wärmeübertrager im Vergleich zu einem idealen Wärmeübertrager ist. Da ein Gleichstromwärmeübertrager jedoch nie ein ε von 1 erreichen kann, wird eine weitere Bewertungsgröße benötigt.

Das Verhältnis $\eta = \varepsilon_{real} / \varepsilon_{id}$ wird als der Gütegrad des Wärmeübertragers bezeichnet [1].

Er gibt an, wie gut ein bestimmter Wärmeübertrager im Vergleich zu einem Wärmeübertrager gleicher Bauart, aber mit unendlich großer Fläche ist.

Beim Gegenstromwärmeübertrager gilt: $\eta_{geg} = \varepsilon_{geg}$

Beim Gleichstromwärmeübertrager gilt: $\eta_{gl} = \left(1 + \frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_2}\right) \cdot \varepsilon_{gl}$

2.2 Temperaturverläufe im Gleich- und Gegenstromwärmeübertrager

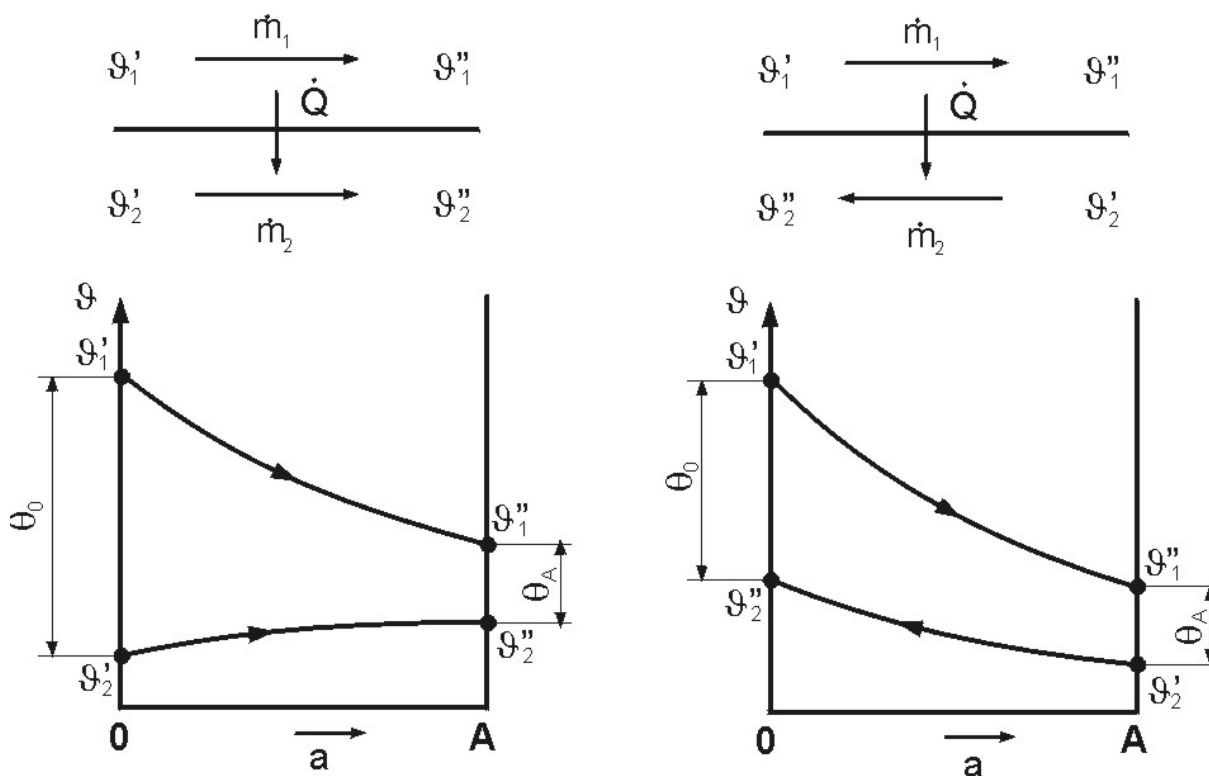


Bild 4: Temperaturverlauf im Gleich- und Gegenstromwärmeübertrager für $\dot{W}_1 < \dot{W}_2$

Durch Aufstellen der Wärmebilanz an einem Flächenelement an der Trennwand zwischen den beiden Fluiden ergeben sich nach Integration folgende Temperaturverläufe:

Für den Gleichstromapparat:

$$\vartheta_1(a) = \vartheta_1' - \frac{\theta_0}{\mu \dot{W}_1} (1 - e^{-\mu \cdot k \cdot a}); \quad \vartheta_2(a) = \vartheta_2' + \frac{\theta_0}{\mu \dot{W}_2} (1 - e^{-\mu \cdot k \cdot a})$$

mit $\theta_0 = \vartheta_1' - \vartheta_2'$, $\theta_A = \vartheta_1'' - \vartheta_2''$ und $\mu = \frac{1}{\dot{W}_1} + \frac{1}{\dot{W}_2}$.

Für den Gegenstromapparat:

$$\vartheta_1(a) = \vartheta_1' - \frac{\theta_0}{\mu \dot{W}_1} (1 - e^{-\mu \cdot k \cdot a}); \quad \vartheta_2(a) = \vartheta_2'' - \frac{\theta_0}{\mu \dot{W}_2} (1 - e^{-\mu \cdot k \cdot a})$$

mit $\theta_0 = \vartheta_1' - \vartheta_2''$, $\theta_A = \vartheta_1'' - \vartheta_2'$ und $\mu = \frac{1}{\dot{W}_1} - \frac{1}{\dot{W}_2}$. Als mittlere treibende Temperaturdifferenz ergibt sich die logarithmische treibende Temperaturdifferenz:

$$\theta_m = \frac{\theta_0 - \theta_A}{\ln \frac{\theta_0}{\theta_A}}$$

Für $\dot{W}_1 = \dot{W}_2$ kann θ_m beim Gegenstromwärmeübertrager nicht aus obiger Formel errechnet werden ($\theta_0 = \theta_A$). Bei diesem Spezialfall ergibt sich (durch Reihenentwicklung):

$$\theta_m = \vartheta_1' - \vartheta_2''.$$

2.3 Literatur

- /1/ Fr. Bošnjaković, Technische Thermodynamik, Verlag Theodor Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1965
- /2/ VDI Wärmeatlas, 9. Auflage, VDI-Verlag, 2002
- /3/ Donald Q. Kern, Process Heat Transfer, McGraw-Hill, New York 1950

3 Versuchsbeschreibung

3.1 Anlagenbeschreibung

Bei dem im Versuch verwendeten Wärmeübertrager handelt es sich um einen Doppelrohrwärmeübertrager, der zu einer Wendel gebogen ist (siehe Bild 6). Die Rohre sind aus Kupfer, das Innenrohr ist außen berippt. Sowohl als warmes Fluid, als auch als kaltes Fluid wird Wasser verwendet. Im Primärkreis wird das Wasser mit einem 4,5 kW-Elektroheizstab (3 x 1,5kW in Sternschaltung) in einem 50l-Speicher erwärmt. Zur Temperaturregelung ist ein Thermostat im Speicher eingebaut. Er wirkt als Ein/ Aus-Schalter auf eine der drei Heizspiralen, die beiden anderen werden von Hand geschaltet. Der Volumenstrom \dot{V}_1 wird mit dem Kugelhahn vor dem Wärmeübertrager eingestellt. Mit zwei Dreiwegekugelhähnen kann die Durchflussrichtung des erwärmten Wassers durch den Wärmeübertrager umgekehrt werden, so dass der Wärmeübertrager sowohl als Gleichstrom- als auch als Gegenstromapparat betrieben werden kann. Zur Kühlung wird Frischwasser verwendet. Der Volumenstrom \dot{V}_2 wird über den Kugelhahn nach dem Wärmeübertrager eingestellt. Die Temperatur des Frischwassers beträgt ca. 10°C und kann nicht verändert werden. Bild 7 zeigt das Anlagenschema.

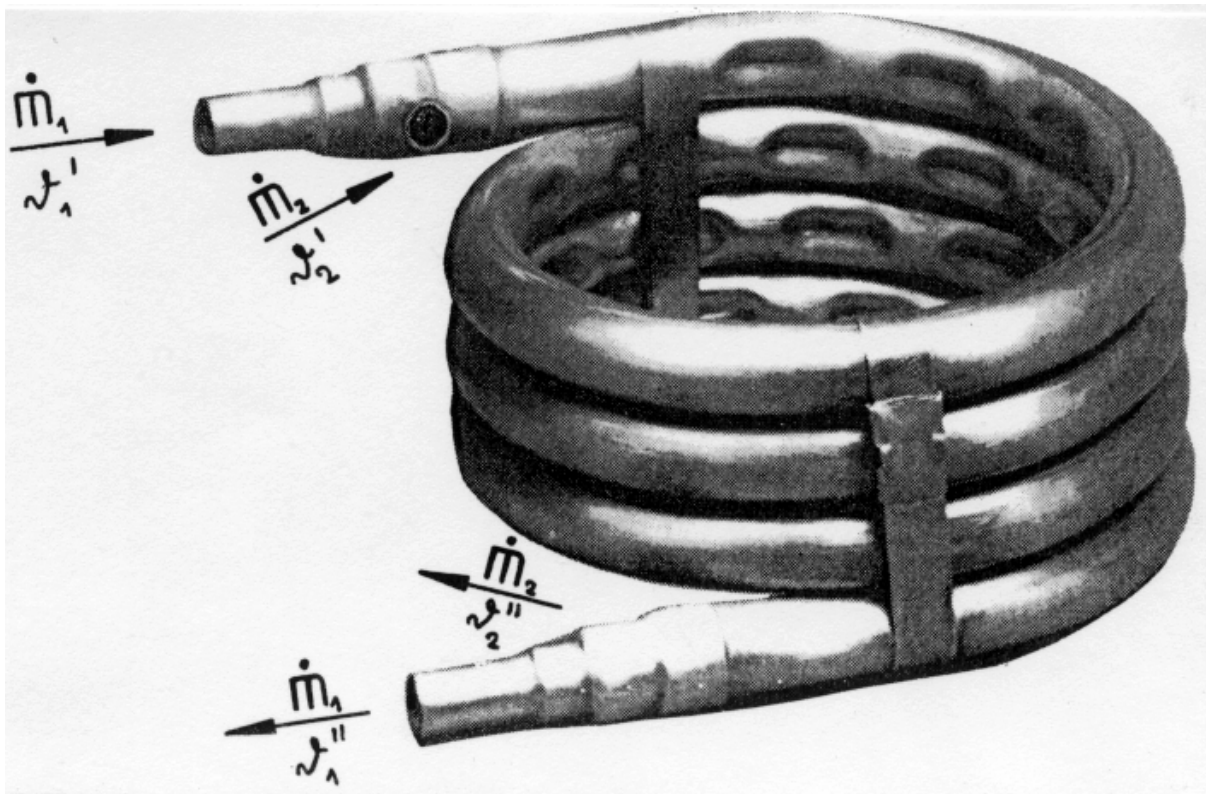


Bild 6: Wärmeübertrager

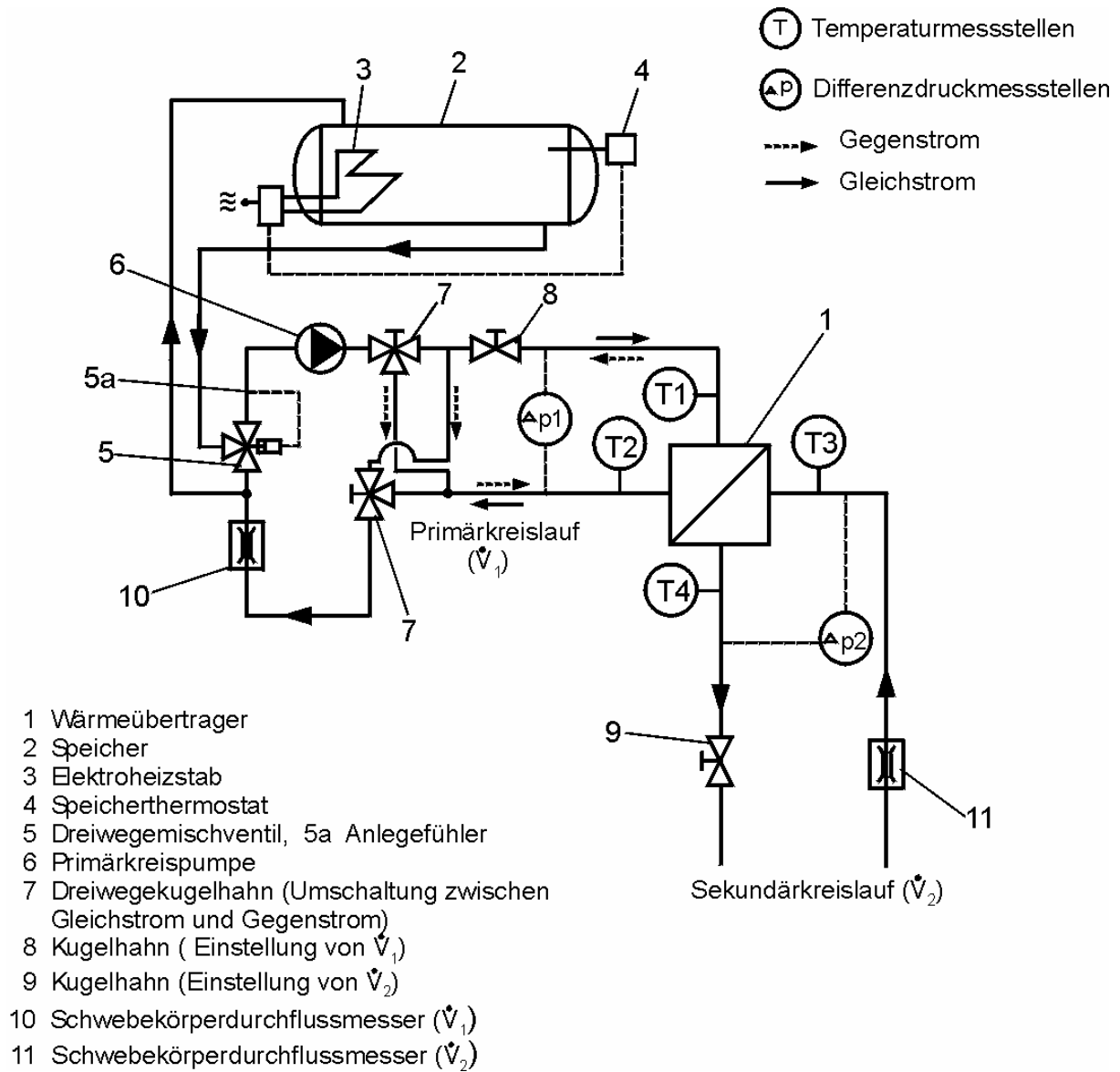


Bild 7: Anlagenschema zum Wärmeübertrager-Versuchsstand

3.2 Messtechnik

3.2.1 Messung der Volumenströme

Die Volumenströme des Primär- und des Sekundärkreislaufes werden mit Schwebekörperdurchflussmessern mit analoger Anzeige gemessen.

Die Temperaturkompensation entfällt, da die einzelnen Durchflussmesser schon auf die verschiedenen Temperaturbereiche kalibriert sind.

Die Durchflussmesser haben die Genauigkeitsklasse 1.6. Der Messfehler kann aus Tabelle1 auf verschiedene Arten ermittelt werden:

Tabelle1: Messfehler der Durchflussmesser

Durchfluss bezogen auf Endwert	Fehler bezogen auf	
	Messwert	Endwert
[%]	[%]	[%]
100	1,600	1,600
90	1,644	1,480
80	1,700	1,360
70	1,771	1,240
60	1,867	1,120
50	2,000	1,000
40	2,200	0,880
30	2,533	0,760
20	3,200	0,640
10	5,200	0,520

Endwert = Skalenendwert = 400 l/h

Bsp.: $\dot{V} = 160 \text{ l/h}$

Durchfluss = 40 % (vom Endwert)

Prozentualer Fehler = $\pm 2,2 \%$

Absoluter Fehler = $160 \text{ l/h} \cdot 0,022 = \pm 3,52 \text{ l/h}$

oder

Absoluter Fehler = $400 \text{ l/h} \cdot 0,088 = \pm 3,52 \text{ l/h}$

Das Messgerät liefert ein Analogsignal im Bereich von 4-20 mA. Dieses Signal wird über einen Präzisionswiderstand von 500Ω in ein Signal von 2-10 V gewandelt (2 V = 0 l/h, 10 V = 400 l/h).

$$\dot{V} = (U - 2 \text{ V}) \cdot 50$$

U: gemessene Spannung in V

3.2.2 Temperaturmessung

Die Ein- und Austrittstemperaturen der beiden Fluidströme des Wärmeübertragers werden mit NiCr/Ni-Thermoelementen gemessen. Sie sind in Tauchfühlern in den Rohren angebracht. Die Thermoelemente sind nach dem Schema in Bild 8 verschaltet. Sie liefern eine Spannung im mV-Bereich, die mit Hilfe eines Ausgleichspolynoms in eine Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ umgerechnet werden:

$$\vartheta = a_3 \cdot U^3 + a_2 \cdot U^2 + a_1 \cdot U + a_0$$

U: gemessene Spannung in mV

$$a_0 = 0,21769311$$

$$a_1 = 24,03443284$$

$$a_2 = 0,00756607$$

$$a_3 = -0,01135896$$

ϑ ; Temperatur in $^{\circ}\text{C}$

4 Versuchsdurchführung

Ziel des Versuchs ist die Bestimmung der übertragenen Wärmeleistung und die Berechnung des Wärmeübertragungsvermögens ($k \cdot A$) des Wärmeübertragers, für verschiedene Volumenströme, Eintrittstemperaturen und Stromführungsarten. Die Geometrie im Inneren des Wärmeübertragers ist nicht genau bekannt. Das Innenrohr ist auf der Innenseite berippt und es sind Einbauten im Wärmeübertrager vorhanden. Deshalb kann der k-Wert nicht aus den Gleichungen, die in der Literatur für das Doppelrohr angegeben werden, berechnet werden. Es kann also nur der Wert ($k \cdot A$) im Versuch experimentell ermittelt werden.

Vorgehensweise für die Messungen:

- Stromführung (Gleich- oder Gegenstrom) einstellen.
- Speicherthermostat auf einen Wert 5 K oberhalb von ϑ'_1 einstellen.
- Mischventil auf Stellung 8 einstellen (bleibt unverändert)
- Primärkreispumpe und Heizung einschalten.
- Heizwasserstrom \dot{V}_1 einstellen.
- Wenn ϑ'_1 einen Wert 3 K unter $\vartheta'_{1,\text{soll}}$ erreicht hat: Kühlwasserstrom \dot{V}_2 einstellen.
- stationären Zustand abwarten: ϑ'_1 sollte höchstens um $\pm 0,5$ K schwanken.
- Messung durchführen: Für die in Tabelle 3 angegebenen Betriebsfälle werden die gesuchten Größen 5-mal im Abstand von je 1 min abgelesen.

Tabelle 3: Durchzuführende Messungen

Messung	ϑ'_1 in °C	\dot{V}_1 in l/h	\dot{V}_2 in l/h	Stromführung	Leistungsstufe
1	40	180	180	Gleichstrom	3kW
2	40	180	180	Gegenstrom	3kW
3	55	180	90	Gegenstrom	3kW
4	55	180	180	Gegenstrom	4,5kW
5	55	180	360	Gegenstrom	4,5kW

Die Messwerte werden in eine Hilfstabelle eingetragen und die Mittelwerte errechnet. Diese werden in Tabelle 4 eingetragen und in die gesuchten Größen umgerechnet.

Die Stoffwerte werden der Tabelle 5 entnommen. Als Bezugstemperaturen werden die arithmetischen Mittel aus den jeweiligen Ein- und Austrittstemperaturen verwendet.

$$\vartheta_{1\text{Bezug}} = (\vartheta'_1 + \vartheta''_1) / 2$$

$$\vartheta_{2\text{Bezug}} = (\vartheta'_2 + \vartheta''_2) / 2$$

5 Auswertung

1. Aus den gemessenen Größen sind zu berechnen und in Tabelle 4 einzutragen:
(Tabelle 4 ist mit der Auswertung abzugeben)

- Die übertragenen Wärmeströme \dot{Q}_1 und \dot{Q}_2 sowie $\Delta\dot{Q} = \left| \dot{Q}_1 \right| - \dot{Q}_2$

- Das Wärmeübertragungsvermögen ($k \cdot A$):

- Aus der Gleichung $\dot{Q} = k \cdot A \cdot \theta_m$ (für die Messung 1)
- Nach dem einheitlichen Berechnungsverfahren (für die Messungen 2-5)

- Der Wirkungsgrad ε ; der Gütegrad η

2. Diskussion des Unterschieds zwischen Gleich- und Gegenstromwärmeübertrager in Hinsicht auf die Austrittstemperaturen und den übertragenen Wärmestrom am Beispiel der Messungen 1 und 2.

3. Diskussion des Verhaltens des Gegenstromwärmeübertragers bei Veränderung des Volumenstroms in Hinsicht auf den übertragenen Wärmestrom (am Beispiel der Messungen 3, 4 und 5).

4. Diskussion des Druckverlustes Δp_2 bei den Messungen 3, 4 und 5.

5. Für den übertragenen Wärmestrom soll eine Fehlerrechnung durchgeführt werden:
Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right| \Delta x_i$$

erhält man den Fehler des übertragenen Wärmestroms $\Delta\dot{Q}_i$ aus der Bestimmungsgleichung $\dot{Q}_i = \dot{V}_i \rho c \cdot (\vartheta'_i - \vartheta''_i)$:

$$\Delta\dot{Q}_i = \rho c |(\vartheta'_i - \vartheta''_i)| \cdot \Delta\dot{V}_i + \rho c \dot{V}_i \cdot \Delta\vartheta_i$$

Für die Fehler der Einzelmessungen werden folgende Werte angenommen:

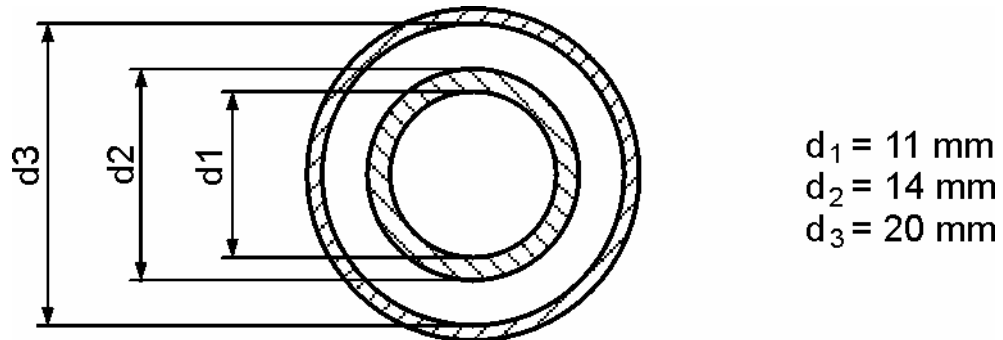
- $\Delta\vartheta = 0,5 \text{ K}$
- $\Delta\dot{V}$ aus Kapitel 3.2.1

Bestimmen Sie den absoluten Fehler vom Messwert und vergleichen Sie diesen Fehler mit den Messergebnissen und kommentieren Sie das Ergebnis.

6. Für Messung 1 und 2: Vergleich der gemessenen Werte des verwendeten Wärmeübertragers mit den berechneten Werten eines Glattrohrwärmeübertragers (nur Hauptfachversuch).

Vergleich mit dem Glattrohrwärmeübertrager (nur Hauptfachversuch)

Der vorhandene Wärmeübertrager soll mit einem Doppelrohrwärmeübertrager, der glatte Rohre besitzt, verglichen werden. Die Durchmesser des Glattrohrwärmeübertragers werden so gewählt, dass er dem vorhandenen Wärmeübertrager entspricht, aber keine Rippen und Einbauten aufweist. Die Gleichungen (1) und (2) gelten für turbulente Strömung. Aufgrund der Berippung und der Wendelform tritt bei dem verwendeten Wärmeübertrager bei allen fünf Messungen turbulente Strömung auf; die Gleichungen (1) und (2) sind in diesem Fall also auch für $Re < 2300$ anzuwenden. Die Durchmesser sind folgender Skizze zu entnehmen.



Die Länge des Wärmeübertragers beträgt $l=1,869\text{m}$. Folgende Gleichungen sind zu verwenden:

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu}$$

mit: Re : Reynoldszahl; d_h : hydraulischer Durchmesser; w : Strömungsgeschwindigkeit;
 ν : kinematische Viskosität.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda}$$

mit: Nu : Nusseltzahl; α : Wärmeübergangskoeffizient; d_h : hydraulischer Durchmesser.
 Für das Innenrohr gilt /2/:

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (1)$$

mit $\xi = (1,82 \log(Re) - 1,64)^{-2}$.

Für den Mantelraum gilt /3/:

$$Nu = 0,36 Re^{0,55} Pr^{0,33} \quad (2)$$

$(k \cdot A)$ berechnet sich aus:

$$k \cdot A_{\text{Bezug}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 A_1} + \frac{1}{\lambda_{cu} F^*} + \frac{1}{\alpha_2 A_2}}$$

mit $\lambda_{cu} = 384 \text{ W/(mK)}$ und $F^* = \frac{2\pi L}{\ln(d_a/d_i)}$ (Formkoeffizient). Als A_{Bezug} ist die Fläche

$A_2 = \pi \cdot d_2 \cdot l$ zu wählen.

Vergleichen Sie Ihr berechnetes $k \cdot A$ mit dem $k \cdot A$ aus Tab. 4 welches Sie auf Basis der Messungen bestimmt haben.

Tabelle 4: Messdaten und Umrechnung in die gesuchten Größen

Messung	1	2	3	4	5
Stromführung	Gleichstrom	Gegenstrom	Gegenstrom	Gegenstrom	Gegenstrom
Leistungsstufe					
U_{V_1} in V					
\dot{V}_1 in l/h					
U_{V_2} in V					
\dot{V}_2 in l/h					
U_{g_1} in mV					
ϑ_1 in °C					
$U_{g_1'}$ in mV					
ϑ_1'' in °C					
$U_{g_2'}$ in mV					
ϑ_2' in °C					
$U_{g_2''}$ in mV					
ϑ_2'' in °C					
$U_{\Delta p_1}$ in V		X	X	X	X
Δp_1 in mbar		X	X	X	X
$U_{\Delta p_2}$ in V					
Δp_2 in mbar					
\dot{W}_1 in W/K					
\dot{W}_2 in W/K					
\dot{Q}_1 in W					
\dot{Q}_2 in W					
$\Delta \dot{Q}$ in W					
θ_m in K					
$k \cdot A$ in W/K					
ε					
η					

Tabelle 5: Stoffwerte von Wasser /2/

Stoffwerte von Wasser beim Druck $p = 1$ bar. Im Gegensatz zu allen anderen Tabellenwerten wurden die Werte für den Temperaturbereich $\vartheta < 0$ °C (unterkühlte Flüssigkeit) mit der IAPWS-95 Formulation [1] berechnet

ϑ Temperatur	c_p spezifische isobare Wärmekapazität	ν kinematische Viskosität
ρ Dichte	β isobarer Volumenausdehnungskoeffizient	a Temperaturleitfähigkeit
h spezifische Enthalpie	λ Wärmeleitfähigkeit	Pr Prandtl-Zahl
s spezifische Entropie	η dynamische Viskosität	

ϑ °C	ρ kg m ⁻³	h kJ kg ⁻¹	s kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	c_p kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	β 10 ⁻³ K ⁻¹	λ 10 ⁻³ W m ⁻¹ K ⁻¹	η 10 ⁻⁶ kg m ⁻¹ s ⁻¹	ν 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹	a 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹	Pr -
-30	983,83	-131,24	-0,50989	4,801	-1,4078	495,7	8653,0	8,795	0,1050	83,80
-25	989,60	-107,95	-0,41506	4,542	-0,9607	511,5	5961,3	6,024	0,1138	52,94
-20	993,57	-85,624	-0,32600	4,401	-0,6604	523,0	4361,9	4,390	0,1196	36,70
-15	996,30	-63,836	-0,24076	4,321	-0,4488	532,9	3338,0	3,350	0,1238	27,06
-14	996,73	-59,521	-0,22408	4,309	-0,4137	534,8	3178,1	3,188	0,1245	25,61
-13	997,13	-55,217	-0,20751	4,299	-0,3806	536,7	3029,8	3,038	0,1252	24,27
-12	997,49	-50,924	-0,19103	4,289	-0,3492	538,6	2892,0	2,899	0,1259	23,03
-11	997,82	-46,639	-0,17466	4,280	-0,3194	540,4	2763,8	2,770	0,1265	21,89
-10	998,13	-42,363	-0,15838	4,272	-0,2911	542,3	2644,2	2,649	0,1272	20,83
-9	998,40	-38,095	-0,14219	4,265	-0,2641	544,2	2532,6	2,537	0,1278	19,85
-8	998,66	-33,833	-0,12609	4,258	-0,2384	546,0	2428,2	2,432	0,1284	18,94
-7	998,88	-29,579	-0,11007	4,252	-0,2139	547,9	2330,5	2,333	0,1290	18,08
-6	999,08	-25,330	-0,09414	4,246	-0,1904	549,8	2238,8	2,241	0,1296	17,29
-5	999,26	-21,087	-0,07828	4,241	-0,1679	551,6	2152,7	2,154	0,1302	16,55
-4	999,42	-16,849	-0,06251	4,236	-0,1463	553,5	2071,7	2,073	0,1308	15,85
-3	999,55	-12,616	-0,04681	4,231	-0,1255	555,4	1995,4	1,996	0,1313	15,20
-2	999,67	-8,3865	-0,03118	4,227	-0,1055	557,3	1923,5	1,924	0,1319	14,59
-1	999,77	-4,1616	-0,01563	4,223	-0,0863	559,2	1855,7	1,856	0,1324	14,01
0	999,84	0,05966	-0,00015	4,219	-0,0677	561,1	1791,5	1,792	0,1330	13,47
1	999,90	4,2774	0,01526	4,216	-0,0497	563,0	1730,9	1,731	0,1335	12,96
2	999,94	8,4918	0,03061	4,213	-0,0324	564,9	1673,4	1,673	0,1341	12,48
3	999,97	12,703	0,04589	4,210	-0,0156	566,8	1618,9	1,619	0,1346	12,03
4	999,97	16,912	0,06110	4,207	0,0006	568,7	1567,2	1,567	0,1352	11,60
5	999,97	21,118	0,07625	4,205	0,0163	570,6	1518,1	1,518	0,1357	11,19
6	999,94	25,322	0,09134	4,203	0,0315	572,5	1471,4	1,472	0,1362	10,80
7	999,90	29,524	0,10636	4,201	0,0463	574,4	1427,0	1,427	0,1367	10,44
8	999,85	33,723	0,12133	4,199	0,0606	576,3	1384,7	1,385	0,1373	10,09
9	999,78	37,921	0,13623	4,197	0,0746	578,2	1344,4	1,345	0,1378	9,759
10	999,70	42,117	0,15108	4,195	0,0881	580,0	1305,9	1,306	0,1383	9,445
11	999,61	46,312	0,16586	4,194	0,1013	581,9	1269,1	1,270	0,1388	9,147
12	999,50	50,505	0,18060	4,193	0,1142	583,8	1234,0	1,235	0,1393	8,862
13	999,38	54,697	0,19527	4,191	0,1267	585,7	1200,5	1,201	0,1398	8,591
14	999,25	58,888	0,20989	4,190	0,1389	587,5	1168,3	1,169	0,1403	8,332
15	999,10	63,078	0,22446	4,189	0,1509	589,4	1137,6	1,139	0,1408	8,085
20	998,21	84,012	0,29648	4,185	0,2066	598,5	1001,6	1,003	0,1433	7,004
25	997,05	104,93	0,36723	4,182	0,2569	607,2	890,08	0,893	0,1456	6,130
30	995,65	125,83	0,43676	4,180	0,3029	615,5	797,35	0,801	0,1479	5,415
35	994,04	146,73	0,50513	4,179	0,3453	623,3	719,32	0,724	0,1501	4,822
40	992,22	167,62	0,57239	4,179	0,3849	630,6	652,98	0,658	0,1521	4,327
45	990,22	188,52	0,63859	4,179	0,4222	637,4	596,07	0,602	0,1540	3,908
50	988,05	209,41	0,70375	4,180	0,4574	643,6	546,85	0,553	0,1559	3,551
55	985,71	230,31	0,76794	4,181	0,4910	649,3	503,98	0,511	0,1575	3,245
60	983,21	251,22	0,83117	4,183	0,5231	654,4	466,40	0,474	0,1591	2,981
65	980,57	272,14	0,89350	4,185	0,5541	659,0	433,27	0,442	0,1606	2,752
70	977,78	293,07	0,95495	4,188	0,5841	663,1	403,90	0,413	0,1619	2,551
75	974,86	314,02	1,0156	4,192	0,6132	666,8	377,75	0,387	0,1632	2,375
80	971,80	334,99	1,0754	4,196	0,6417	670,0	354,35	0,365	0,1643	2,219
85	968,62	355,98	1,1344	4,200	0,6695	672,8	333,35	0,344	0,1654	2,081
90	965,32	376,99	1,1926	4,205	0,6970	675,3	314,41	0,326	0,1664	1,958
95	961,89	398,03	1,2502	4,211	0,7241	677,4	297,29	0,309	0,1672	1,848
99,61 ^{a)}	958,64	417,44	1,3026	4,216	0,7489	679,0	282,92	0,295	0,1680	1,757

^{a)} Sättigungszustand

Hilftabellen zum Aufzeichnen der Einzelmessungen, Ergebnis in Tabelle 4 übertragen

Messung 1	1	2	3	4	5	Durchschnitt
Kanal 1 ϑ_1'						
Kanal 2 ϑ_1''						
Kanal 4 ϑ_2''						
Kanal 5 Δp_1						
Kanal 6 Δp_2						
Kanal 7 ϑ_2'						
Kanal 8 \dot{V}_1						
Kanal 9 \dot{V}_2						

Messung 2	1	2	3	4	5	Durchschnitt
Kanal 1 ϑ_1''						
Kanal 2 ϑ_1'						
Kanal 4 ϑ_2''						
Kanal 6 Δp_2						
Kanal 7 ϑ_2'						
Kanal 8 \dot{V}_1						
Kanal 9 \dot{V}_2						

Messung 3	1	2	3	4	5	Durchschnitt
Kanal 1 ϑ_1''						
Kanal 2 ϑ_1'						
Kanal 4 ϑ_2''						
Kanal 6 Δp_2						
Kanal 7 ϑ_2'						
Kanal 8 \dot{V}_1						
Kanal 9 \dot{V}_2						

Hilfstabellen zum Aufzeichnen der Einzelmessungen, Ergebnis in Tabelle 4 übertragen

Messung 4	1	2	3	4	5	Durchschnitt
Kanal 1 ϑ_1''						
Kanal 2 ϑ_1'						
Kanal 4 ϑ_2''						
Kanal 6 Δp_2						
Kanal 7 ϑ_2'						
Kanal 8 \dot{V}_1						
Kanal 9 \dot{V}_2						

Messung 5	1	2	3	4	5	Durchschnitt
Kanal 1 ϑ_1''						
Kanal 2 ϑ_1'						
Kanal 4 ϑ_2''						
Kanal 6 Δp_2						
Kanal 7 ϑ_2'						
Kanal 8 \dot{V}_1						
Kanal 9 \dot{V}_2						