

VIII Wärmetauscher

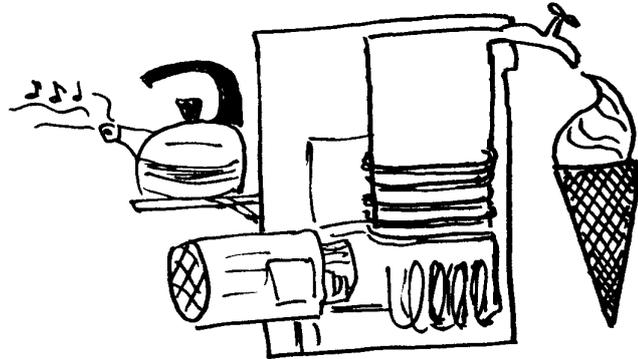
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Wiederholung wichtiger theoretischer Grundlagen	2
2.1	Erwärmen von Stoffen	2
2.1.1	Wärmestrom	2
2.1.2	Wärmeenergie	3
2.2	Wärmetransport	3
2.2.1	Wärmetransport durch Wärmeleitung	3
2.2.2	Wärmetransport durch Konvektion (Wärmeübergang)	5
2.3	Wärmedurchgang	7
3	Grundlagen der Wärmetauscher	9
3.1	Funktionsweise	9
3.2	Strömungsführung	10
3.2.1	Gleichstrom	10
3.2.2	Gegenstrom	10
3.2.3	Kreuzstrom	11
3.3	Auslegung	12
3.3.1	Abgegebene/Aufgenommener Wärmestrom	12
3.3.2	Wärmestrom bei Wärmedurchgang	12
4	Versuchsteil	14
4.1	Versuchsaufbau	14
4.2	Versuchsplanung	18
4.3	Rücksprache vor Versuchsbeginn	19
4.4	Versuchsdurchführung und -auswertung	20
4.5	Bewertung der Versuche	21
5	Was war wichtig?	22
6	Formelzeichen	23
7	Literaturverzeichnis	24

VIII Wärmetauscher

1 Einleitung

Wärmetauscher sind Apparate, in denen Wärme von einem strömenden Fluid hoher Temperatur auf ein strömendes Fluid niedriger Temperatur übertragen wird, ohne daß die beiden Stoffe sich vermischen.



Ein allgemein bekanntes Beispiel ist der Kühler im Kraftfahrzeug, in dem erwärmtes Kühlwasser durch die umströmende Luft abgekühlt wird. Im Kreislauf zirkulierend, nimmt das Kühlwasser wiederum die Wärme des Motors auf.

Wärmetauscher spielen in vielen Bereichen der Technik eine wichtige Rolle. Innerhalb einer Anlage treten beispielsweise oft durch chemische Reaktionen hohe Temperaturen auf. Dadurch entstehen Wärmeverluste an die Umgebung, was Energieverluste und somit Kosten für den Prozeß bedeutet.

Hohe Temperaturen können zudem zur Beschädigung oder Zerstörung von Stoffen führen. Letztlich können sich Gefahren durch Bildung von giftigen Stoffen oder aus Festigkeitsgründen der Apparate ergeben.

Sowohl aus Qualitäts- als auch aus Sicherheitsgründen ist es daher häufig erforderlich zu kühlen.

Jedoch wird auch die Wirtschaftlichkeit von Anlagen durch Wärmetauscher erhöht. Häufig müssen Stoffe an einer Stelle des Prozesses erwärmt werden, damit sie sich richtig verarbeiten lassen. Die Wärme, die an manchen Stellen frei wird oder abgeführt werden muß, kann fast immer zum Erwärmen anderer Stoffe innerhalb des Prozesses verwendet werden.

Desweiteren finden Wärmetauscher in den letzten Jahren innerhalb verfahrenstechnischer Anlagen und Blockheizkraftwerken zunehmend Anwendung, um mit der anfallenden Prozeßwärme Warmwasser für Wohngebiete oder öffentliche Gebäude zu erzeugen.

Die Auswahl einer geeigneten Bauform, die Dimensionierung und die Wahl geeigneter Materialien in Abhängigkeit der vorgegebenen Randbedingungen und erwünschten Ergebnisse stellen somit wichtige Aspekte bei der Neuanschaffung von Wärmetauschern innerhalb einer Anlage dar.

2 Wiederholung wichtiger theoretischer Grundlagen

2.1 Erwärmen von Stoffen

2.1.1 Wärmestrom

Die pro Zeiteinheit transportierte Wärmemenge bezeichnet man als Wärmestrom.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (\text{VIII.1})$$

\dot{Q} : Wärmestrom in W
 Q: Wärmeenergie in J
 t: Zeit in s

2.1.2 Wärmeenergie

Die erforderliche Wärmeenergie Q, um die Masse m eines Stoffes mit der spezifischen Wärmekapazität c von einer Temperatur T_0 auf eine Temperatur T zu erwärmen (oder abzukühlen), errechnet sich zu

$$Q = m \cdot c \cdot (T - T_0) \quad (\text{VIII.2})$$

Q: Wärme in J
 m: Masse in kg
 c: Spezifische Wärmekapazität in J/(kgK)
 T: Endtemperatur in K
 T_0 : Anfangstemperatur in K

Macht man eine Energiebilanz für einen strömenden Stoff (Differenz zwischen Energiezustand am Anfang und am Ende), so errechnet sich der Wärmestrom, der verloren geht oder aufgenommen wird, unter Berücksichtigung der Gleichungen (VIII.1) und (VIII.2) zu:

$$Q = m \cdot c \cdot (T - T_0) \quad / \cdot \frac{1}{t}$$

$$\frac{Q}{t} = \frac{m \cdot c \cdot (T - T_0)}{t}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (T - T_0)$$

(VIII.3)

- \dot{Q} : Wärmestrom in W
 \dot{m} : Massenstrom in kg/s
 c : Spezifische Wärmekapazität in J/(kgK)
 T : Endtemperatur in K
 T_0 : Anfangstemperatur in K

Die Gleichungen (VIII.1), (VIII.2) und (VIII.3) gelten nur, solange keine Aggregatzustandsänderung des Stoffes erfolgt.

Bei Änderung des Aggregatzustandes müssen zusätzlich die Schmelzwärme Q_{sm} bzw. die Verdampfungswärme Q_{sd} berücksichtigt werden.

2.2 Wärmetransport

Wenn zwei Körper unterschiedliche Temperaturen haben, so findet immer ein Austausch von Wärme statt. Die Art und Weise, wie ein Wärmestrom von einer Stelle zur anderen transportiert oder übertragen wird, bezeichnet man als Wärmetransport, Wärmeübertragung oder Wärmeausbreitung.

Wir werden künftig nur die Bezeichnung Wärmetransport verwenden.

Die Wärme kann auf verschiedene Arten transportiert werden:

- durch Wärmeleitung
- durch Konvektion oder Wärmeübergang oder
- durch Wärmestrahlung

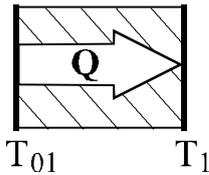
Die drei Arten der Wärmeübertragung kommen fast immer gemeinsam vor.

Der Anteil der Wärmestrahlung am Wärmetransport macht sich allerdings erst im Bereich hoher Temperaturen bemerkbar, so daß auf sie nicht weiter eingegangen werden soll.

2.2.1 Wärmetransport durch Wärmeleitung

Ist ein Ende eines Körpers wärmer als ein anderes (Abb.VIII-1), so wird die Wärmeenergie von Stoffteilchen höherer Energie zu Stoffteilchen geringerer Energie weitergegeben. Dadurch wird die Wärme durch den Körper transportiert, man spricht von **Wärmeleitung**.

Die Stoffteilchen bewegen sich dabei nicht fort, es findet also **kein Teilchentransport** statt.



Bei gleich großen Ein- und Austrittsflächen, die jedoch unterschiedliche Temperaturen haben (z.B. eine ebene Wand), errechnet sich die transportierte Wärmemenge wie folgt:

Abb.VIII-1:
Wärmeleitung

$$Q = \frac{\lambda \cdot A \cdot t \cdot \Delta T}{L} \quad (\text{VIII.4})$$

- Q: Transportierte Wärmemenge in J
 λ : Wärmeleitfähigkeit des Materials in W/(mK)
 A: Querschnittsfläche des Wärmeleiters in m²
 t: Dauer der Wärmeleitung in s
 ΔT : Temperaturdifferenz in K
 $\Delta T = T_1 - T_{01}$
 L: Dicke des Wärmeleiters in m

Für unterschiedlich große Ein- und Austrittsflächen (z.B. Rohre) muß eine mittlere Querschnittsfläche berechnet werden. Je nach Geometrie der Flächen sind in der Fachliteratur [VDI] entsprechende Berechnungsformeln zu finden.

Bei radialer Wärmeleitung (Abb.VIII-2) in einer Rohrwand errechnet sich die transportierte Wärme wie folgt:

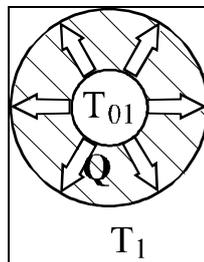


Abb.VIII-2: Wärmeleitung
in einer
Rohrwand

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \cdot \lambda \cdot t \cdot \Delta T \quad (\text{VIII.5})$$

- Q: Transportierte Wärmemenge in J
 l: Länge des Rohres in m
 d_a : Rohraußendurchmesser in m
 d_i : Rohrinne Durchmesser in m
 λ : Wärmeleitfähigkeit des Materials in W/(mK)
 t: Dauer der Wärmeleitung in s
 ΔT : Temperaturdifferenz in K
 $\Delta T = T_1 - T_{01}$

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine Stoffgröße, die in Tabellenwerken (Auszug in Abb.VIII-3) [Kuchling] nachgeschlagen werden kann.

Stoff	λ in W/(mK) bei 20°C	Stoff	λ in W/(mK) bei 20°C	Stoff	λ in W/(mK) bei 20°C
Aluminium (99%)	220	Holz	0,1 - 0,2	Silikonöl	ca. 0,14
Asbestplatte	0,7	Kupfer	384	Stahl	45
Beton	ca. 1,0	Luft	0,0026	Stahl: V2A	15
Eis (0°C)	2,2	Messing	113	Styropor	0,036
Eisen	74	Paraffinöl	0,124	Teflon	0,2
Glaswolle	0,042	Porzellan	ca. 1,0	Wasser	0,598
Gußeisen	ca. 50	Sand (trocken)	0,35	Zylinderöl	0,138

Abb.VIII-3: Wärmeleitfähigkeit

2.2.2 Wärmetransport durch Konvektion (Wärmeübergang)

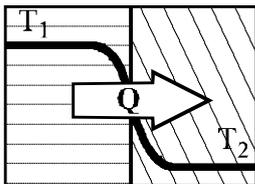


Abb.VIII-4: Wärmeübergang

Zwischen Fluiden (Gasen und Flüssigkeiten) und festen Körpern unterschiedlicher Temperatur, die miteinander in Berührung stehen (Abb.VIII-4), findet ein Wärmetransport statt, den man als **Wärmeübergang** oder **Konvektion** bezeichnet. Dieser Transport ist jeweils an einen Transport von Materie gebunden. Die Stoffteilchen bewegen sich und transportieren dabei die Wärme.

Man unterscheidet zwischen **freier Konvektion** und **erzwungener Konvektion**.

Freie Konvektion entsteht durch Strömung von Fluiden, (Flüssigkeiten oder Gase), wenn diese durch Erwärmen eine geringere Dichte erhalten und somit aufsteigen.

In der Technik spielt der Wärmetransport durch freie Konvektion eine unbedeutende Rolle.

Erzwungene Konvektion liegt vor, wenn dem Fluid von außen eine Strömung aufgezwungen wird, beispielsweise durch Pumpen oder die Art der Leitungsführung (abfallende Leitungen).

Die erzwungene Konvektion kommt praktisch bei jedem Wärmetransport vor.

Der Wärmetransport durch Konvektion oder der Wärmeübergang findet an der Kontaktfläche zwischen den Stoffen statt und berechnet sich aus:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot \Delta T$$

(VIII.6)

Q: Durch eine Grenzfläche durchgetretene Wärmemenge in J

α : Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2K)$

A: Übergangsfläche in m^2

t: Dauer der Wärmeleitung in s

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen der Stoffe in K

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

Der **Wärmeübergangskoeffizient** α hängt vom Fluid, seiner Bewegung und der Oberfläche des festen Körpers ab, nicht jedoch vom Material des festen Körpers. Die genaue Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten ist recht schwierig. Sie erfolgt über sogenannte Kennzahlen (Nusselt, Prandtl, Reynolds ...) [Grassmann], auf die wir hier nicht weiter eingehen wollen.

Richtwerte für Wärmeübergangskoeffizienten sind in Tabellenwerken (Auszug in Abb.VIII-5) [Kuchling] nachzulesen.

Stoffe	α in $W/(m^2K)$	Stoffe	α in $W/(m^2K)$
Luft senkrecht zu Metallwand:		Wasser um Rohre:	
- ruhend	3,5 - 35	- ruhend	350 - 580
- mäßig bewegt	23 - 70	- strömend	$350 + 2100\sqrt{v}$
- kräftig bewegt	58 - 290		(v in m/s)
Luft längs ebener Eisenwand:		Strömendes Wasser in Rohren	2300 - 4700
- $v < 5$ m/s	$5,8 + 4 \cdot v$	Siedendes Wasser in Rohren	4700 - 7000
- $v > 5$ m/s	$7,14 \cdot v^{0,78}$		
	(v jeweils in m/s)		
Wasser in Kesseln und Behältern	580 - 2300	Siedendes Wasser an Metallfläche	3500 - 5800
Wasser in Kesseln und Behältern mit Rührwerk	2300 - 4700	Kondensierter Wasserdampf	11600

Abb.VIII-5: Wärmeübergangskoeffizienten (Richtwerte)

2.3 Wärmedurchgang

Man spricht von **Wärmedurchgang**, wenn mehrere Wärmeträger, z.B. Wände oder Fluide, am Wärmetransport beteiligt sind.

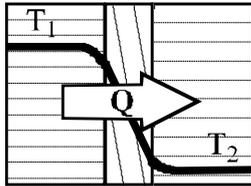


Abb.VIII-6: Wärmedurchgang

Für die Wärme, die von einem Fluid durch eine Trennwand hindurch zu einem anderen Fluid (Abb.VIII-6) transportiert wird, berechnet sich der Wärmedurchgang nach :

$$Q = U \cdot A \cdot t \cdot \Delta T \quad (\text{VIII.7})$$

Q: Transportierte Wärmemenge beim Wärmedurchgang in J

U: Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2K)$

A: Übergangsfläche in m^2

t: Dauer der Wärmeleitung in s

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen den beiden Fluiden in K

Unter Berücksichtigung der Gleichung (VIII.1) berechnet sich der Wärmestrom beim Wärmedurchgang (d.h. die Wärme, die pro Zeiteinheit durch die Trennwand geht) aus:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{VIII.8})$$

Der **Wärmedurchgangskoeffizient U** berücksichtigt den **Wärmeübergang** vom ersten Fluid zur Trennwand, die **Wärmeleitfähigkeit** der Trennwand und den **Wärmeübergang** von der Trennwand zum zweiten Fluid.

Im Falle einer **ebenen Wand** errechnet sich der Wärmedurchgangskoeffizient nach

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (\text{VIII.9})$$

U: Wärmedurchgangskoeffizient an ebener Wand in $W/(m^2K)$

α_1 : Wärmeübergangskoeffizient Fluid 1/Wand in $W/(m^2K)$

α_2 : Wärmeübergangskoeffizient Fluid 2/Wand in $W/(m^2K)$

L: Dicke der Wand in m

λ : Wärmeleitfähigkeit der Wand in $W/(mK)$

Bei **mehrschichtigen Wänden** erweitert sich Gleichung (VIII.9) pro Schicht jeweils um einen Koeffizienten "Wanddicke/Wärmeleitfähigkeit " der entsprechenden Schicht.

Bei **Rohrleitungen** wird die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten schwieriger, weil die unterschiedlich großen Ein- und Austrittsflächen berücksichtigt werden müssen.

Für den Fall von zwei Fluiden, die durch eine **Rohrwand** getrennt sind, gilt:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{d_a}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{d_a}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} \quad (\text{VIII.10})$$

U: Wärmedurchgangskoeffizient an einer Rohrwand in $W/(m^2K)$

α_a : Wärmeübergangskoeffizient Fluid /Außenwand in $W/(m^2K)$

α_i : Wärmeübergangskoeffizient Fluid /Innenwand in $W/(m^2K)$

d_a : Rohraußendurchmesser in m

d_i : Rohrinnendurchmesser in m

λ : Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials in $W/(mK)$

3 Grundlagen der Wärmetauscher

3.1 Funktionsweise

Wärmetauscher werden von zwei Fluiden durchströmt, die durch Bleche oder Rohrleitungen getrennt sind.

Je nach Bauweise des Wärmetauschers kann die Strömungsführung im Apparat unterschiedlich sein. Die beiden Stoffströme werden jedoch nie vermischt, es findet **nur ein Wärmeaustausch** zwischen den Stoffen statt.

Die graphischen Symbole nach DIN 30600 für Wärmetauscher sind in Abb.VIII-7 und Abb.VIII-8 dargestellt. In Fließbildern, in denen der Aufbau und die Funktionsweise verfahrenstechnischer Anlagen dargestellt wird, sind diese Symbole zu verwenden.

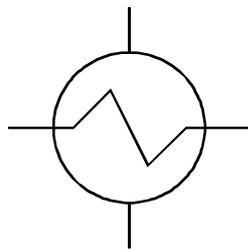


Abb.VIII-7: Wärmetauscher mit Kreuzung der Fließlinien

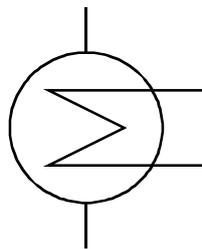


Abb.VIII-8: Wärmetauscher ohne Kreuzung der Fließlinien

Der eine Stoffstrom ist beim Eintritt in den Wärmetauscher warm. Er strömt durch den Apparat und gibt dabei seine Wärme ab. Diese wird durch die Trennwand hindurch transportiert und führt zu einer Temperaturerhöhung des zweiten Stoffstromes.

Der ursprünglich warm eingetretene Stoffstrom verläßt den Wärmetauscher daher mit einer geringeren Temperatur, er hat sich abgekühlt.

Ein zweiter Stoffstrom tritt mit niedrigerer Temperatur als der erste in den Wärmetauscher ein. Er nimmt die Wärme auf, die der erste Stoffstrom abgibt, so daß sich seine Temperatur beim Durchfließen des Apparates erhöht.

Beim Austritt aus dem Wärmetauscher ist der zweite Stoffstrom wärmer als beim Eintritt.

Weil der kalte Stoffstrom die Wärme aufnimmt oder gewinnt, die der warme Stoffstrom abgibt, bezeichnet man Wärmetauscher auch als **Rekuperatoren** (franz. "récupérer" = zurückgewinnen).

Verändert sich in einem Apparat durch den Wärmestrom der Aggregatzustand eines Stoffes, so spricht man nicht von einem Wärmetauscher, sondern je nach Zustandsänderung von einem **Verdampfer** oder einem **Kondensator**.

3.2 Strömungsführung

Je nach Richtung der beiden Stoffströmungen zueinander unterscheidet man beim Betrieb eines Wärmetauschers zwischen den Idealfällen **Gleichstrom**, **Gegenstrom** und **Kreuzstrom**.

3.2.1 Gleichstrom

Beide Stoffe strömen in gleicher Richtung entlang einer Trennwand (Abb.VIII-9)

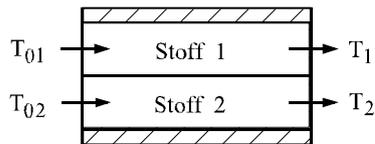


Abb. VIII-9: Stromführung bei Gleichstrom

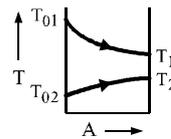


Abb. VIII-10: Temperaturverlauf bei Gleichstrom

Die Temperaturdifferenz der beiden Stoffe ist am Einlauf ($T_{01}-T_{02}$) am größten.

Die Veränderung der Temperatur der beiden Stoffströme ist in Abb.VIII-10 über der Austauschfläche A aufgetragen. Die Austauschfläche wird mit zunehmender Länge der Leitungen, durch die die Stoffe strömen, größer.

Mit zunehmender Austauschfläche wird die Temperaturdifferenz immer kleiner. Deshalb ist bei Gleichstrom der Wärmeaustausch zwischen den beiden Stoffen relativ gering.

3.2.2 Gegenstrom

Die beiden Stoffe strömen in entgegengesetzter Richtung (Abb.VIII-11)

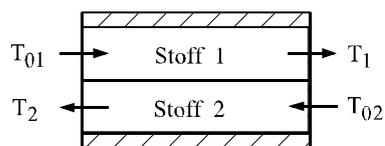


Abb. VIII-11: Stromführung bei Gegenstrom

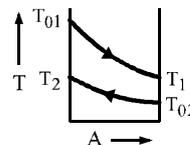


Abb. VIII-12: Temperaturverlauf bei Gegenstrom

Der in Abb.VIII-12 dargestellte Verlauf der Temperaturen der Stoffströme zeigt, daß die **Temperaturdifferenzen** der jeweiligen Stoffe bei Gegenstrom **im Mittel größer** sind als bei Gleichstrom, so daß man einen größeren Wärmeaustausch erreicht.

3.2.3 Kreuzstrom

Die beiden Stoffe strömen quer zueinander (Abb.VIII-13).

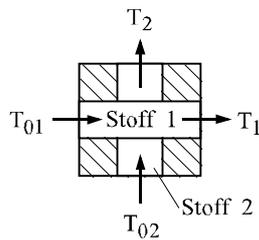


Abb. VIII-13: Stromführung bei Kreuzstrom

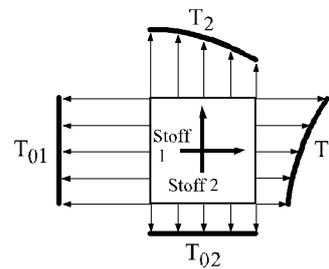


Abb. VIII-14: Temperaturverlauf bei Kreuzstrom

Über den Querschnitt der Stoffströmung ist die Temperatur nicht gleichmäßig verteilt, wie in Abb.VIII-14 zu erkennen ist. Diese unregelmäßige Temperaturverteilung, bedingt durch die Stromführung, ist stärker ausgeprägt als im Gleich- oder Gegenstromverfahren.

Der Wärmeaustausch liegt zwischen denen beim Gleichstrom- und Gegenstromverfahren.

Bei der großen Anzahl an Wärmetauschern die es gibt, entspricht die Strömungsführung nicht immer eindeutig einer der drei dargestellten Kategorien. Kombinationen aus den Idealfällen Gleichstrom, Gegenstrom und Querstrom bezeichnet man allgemein als **Mischstrom**.

3.3 Auslegung

3.3.1 Abgebener/Aufgenommener Wärmestrom

Der Wärmestrom, den ein Fluid zwischen Eintritt und Austritt eines Wärmetauschers aufnimmt oder abgibt, lässt sich einfach aus einer Energiebilanz für diesen Stoff berechnen.

Entsprechend Gleichung VIII.3 gilt:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (T - T_0)$$

Er errechnet sich aus dem Massenstrom, der spezifischen Wärmekapazität des Stoffes und den Temperaturdifferenzen zwischen Eintritt und Austritt.

3.3.2 Wärmestrom beim Wärmedurchgang

Der Wärmestrom beim Wärmedurchgang von einem Fluid auf ein anderes hängt von der Wärmedurchgangszahl ab.

Diese berücksichtigt die Wärmeübergangszahlen (für den Transport von den Fluiden zur Wand) und die Wärmeleitung (durch die Wand hindurch).

Der Wärmestrom lässt sich entsprechend Gleichung VIII.8

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

aus dem Wärmedurchgangskoeffizient, der Austauschfläche und den Temperaturdifferenzen berechnen.

Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Stoffströmen ist jedoch nicht an jeder Stelle im Wärmetauscher gleich. Für beide Fluide ändert die Temperatur vom Eintritt in den Apparat bis hin zum Austritt. Dementsprechend verändert sich die Differenz zwischen den Temperaturen beider Stoffströme auch laufend.

Zur Berechnung des Wärmestromes beim Wärmedurchgang betrachtet man daher zunächst die **Temperaturdifferenzen** der beiden Stoffströme **an beiden Enden des Wärmetauschers**:

ΔT_A : Temperaturdifferenz der beiden Stoffströme an einem Ende des Wärmetauschers.

ΔT_B : Temperaturdifferenz der beiden Stoffströme am anderen Ende des Wärmetauschers.

Dabei ist es nicht von Bedeutung, welche Seite des Wärmetauschers welche Bezeichnung hat.

Bei **Gleichstrom** erhält man entsprechend Abb.VIII-10 beispielsweise:

$$\Delta T_A = T_{01} - T_{02}$$

$$\Delta T_B = T_1 - T_2$$

Bei **Gegenstrom** gilt nach Abb.VIII-10 beispielsweise:

$$\Delta T_A = T_1 - T_{02}$$

$$\Delta T_B = T_{01} - T_2$$

Für **Gleichstrom** und **Gegenstrom** rechnet sich die **mittlere Temperaturdifferenz** ΔT_m [VDI] aus:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} \quad (\text{VIII.11})$$

ΔT_A : Temperaturdifferenz an einem Ende des Wärmetauschers in K

ΔT_B : Temperaturdifferenz am andern Ende in K

ΔT_m : Mittlere Temperaturdifferenz in K

Bei **Kreuzstrom** und **Mischstrom** liegen die Werte für die mittleren Temperaturdifferenzen zwischen den Werten für Gleichstrom und Gegenstrom. Formeln für die Berechnung der mittleren Temperaturdifferenzen sind in der Fachliteratur [VDI] nachzulesen.

Der **Wärmestrom beim Wärmedurchgang** errechnet sich mit Gleichung VIII.8 und der für den Wärmetauscher definierten mittleren Temperaturdifferenz zu

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (\text{VIII.12})$$

\dot{Q} : Wärmestrom beim Wärmedurchgang in W

U: Wärmedurchgangskoeffizient in W/(m²K)

A: Übergangsfläche in m²

ΔT_m : Mittlere Temperaturdifferenz zwischen den beiden Fluiden in K

4 Versuchsteil

4.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsapparatur (Abb.VIII-15) besteht aus einem Gerüst mit Rohrleitungen, Ventilen, Temperaturmeßgeräten, Meßzylindern und einem Warmwasserboiler. Auf dieses Gerüst wird ein Wärmetauscher gelegt und mit flexiblen Rohrleitungen (Schläuchen) an die Apparatur angeschlossen.

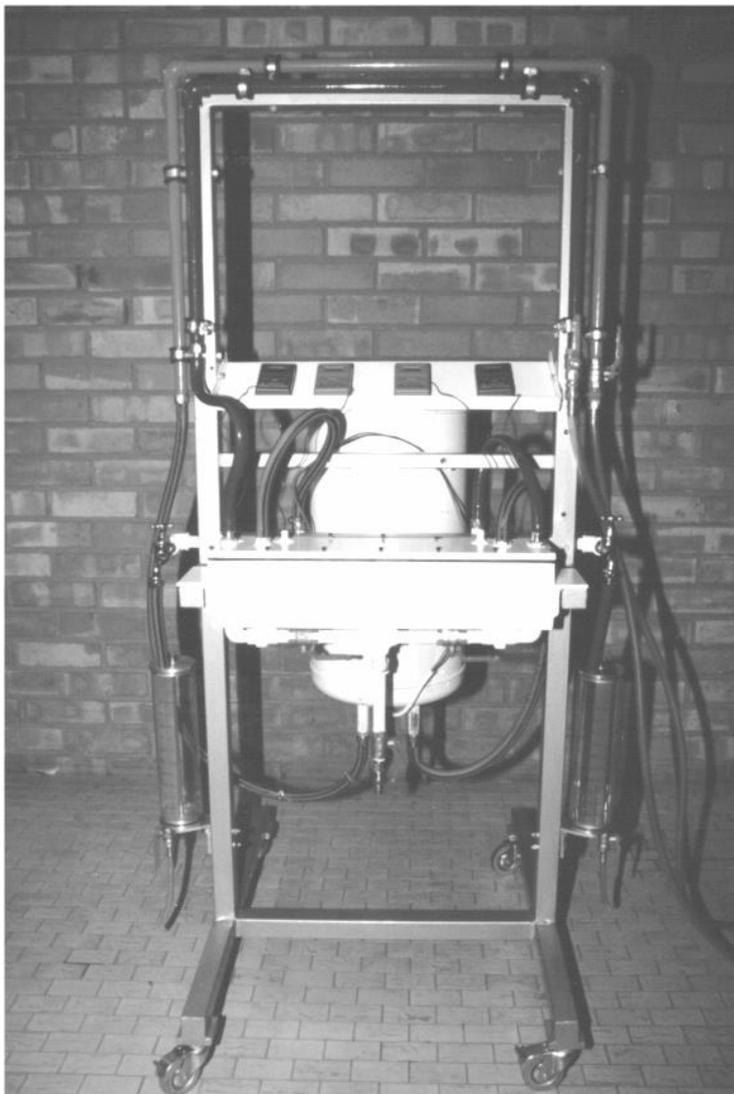


Abb.VIII-15: Versuchsapparatur

Gerüst

Die Apparatur ist so gebaut (Abb.VIII-16), daß sie mit kaltem Wasser aus dem Hausnetz betrieben wird. Sie wird mit zwei Schläuchen an Wasserhähne im Raum angeschlossen.

In die Apparatur können verschiedene Wärmetauscher integriert werden. Je nachdem, wie diese mittels Schlauchverbindungen angeschlossen werden, ist ein Betrieb im Gleichstrom oder im Gegenstrom möglich.

Der erste Wasserstrom aus dem Hausnetz fließt zunächst durch eine feste Leitung, bevor er in den Wärmetauscher geleitet wird. Hinter dem Wärmetauscher wird er durch ein Regelventil geführt, an dem der Volumenstrom eingestellt wird.

Der zweite Wasserstrom wird ebenfalls zunächst durch eine feste Leitung geführt, an die dann ein elektrischer Warmwasserboiler angeschlossen ist. Nach dem Boiler wird das erwärmte Wasser in den Wärmetauscher geleitet und zu einem Regelventil geführt, an dem der Volumenstrom eingestellt wird.

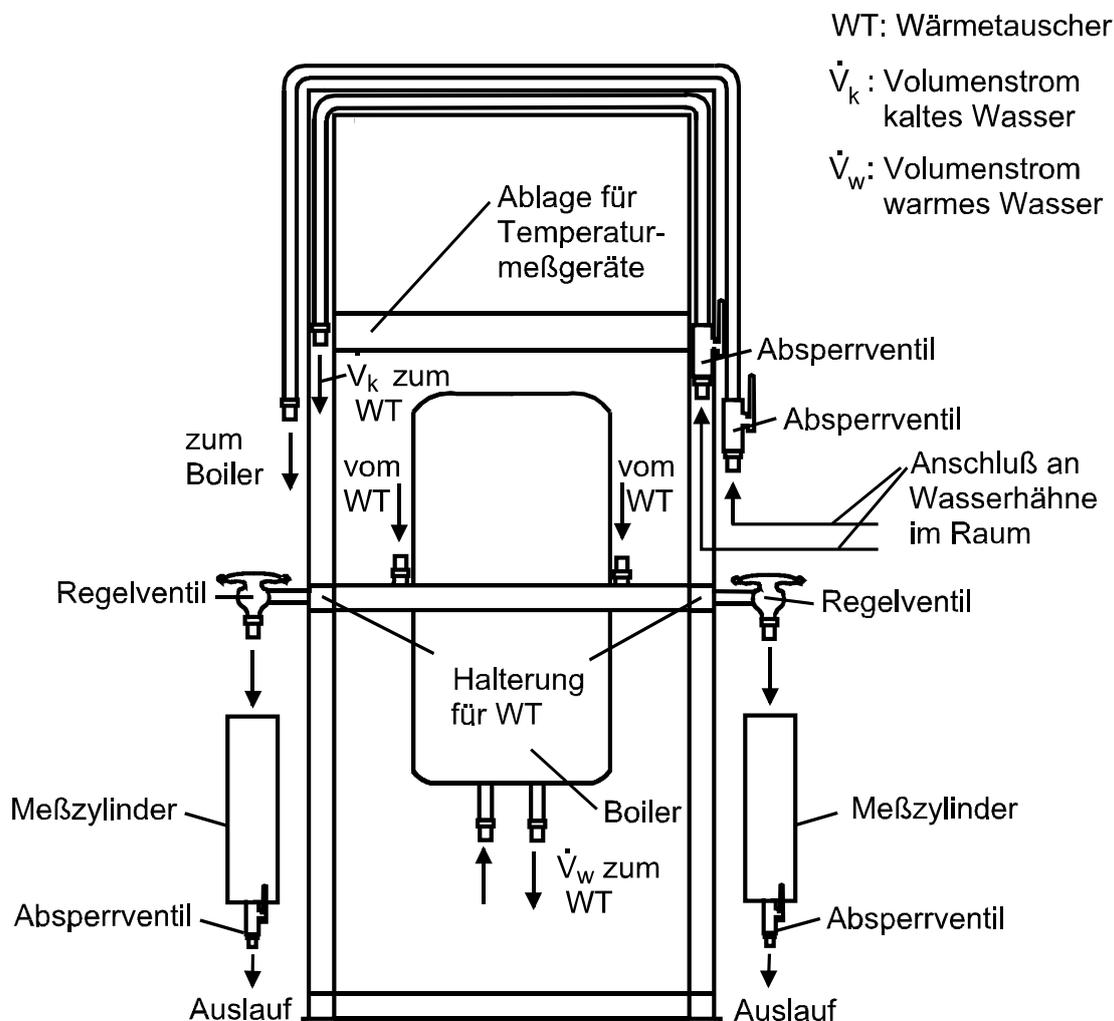


Abb. VIII-16: Aufbau des Gerüsts mit Boiler und Meßzylinder



In beide feste Leitungen, die über die Schläuche mit den Wasserhähnen im Raum verbunden werden, sind am Rohranfang je ein Absperrventil eingebaut. Die Volumenströme werden jeweils hinter dem Wärmetauscher an einem Regelventil eingestellt. Anschließend kann bis zum Versuchsbeginn das Durchströmen der Anlage über die Absperrventile abgestellt werden.

Zum Einstellen der Volumenströme dienen zwei Meßzylinder (Abb.VIII-17), die unterhalb der Regelventile am Gerüst befestigt sind.

Zur Versuchsanlage gehören desweiteren vier Temperaturmeßgeräte, die in den einzubauenden Wärmetauscher gesteckt werden.

Abb.VIII-17: Meßzylinder

Wärmetauscher

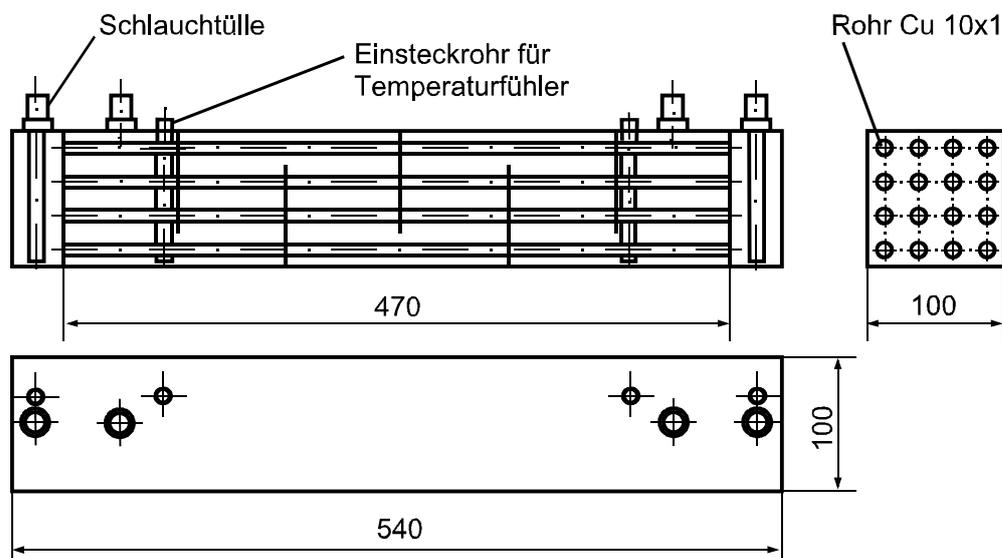


Abb.VIII-18: Hauptabmessungen des Rohrbündelwärmetauschers

Als Wärmetauscher steht ein Rohrbündelwärmetauscher (Abb.VIII-18 und Abb.VIII-19) zur Verfügung.

Das Rohrbündel besteht aus 16 Kupferrohren mit einem Außendurchmesser von 10 mm und einem Innendurchmesser von 8 mm. Fünf Umlenkbleche führen dabei zu einem gleichmäßigen Wärmeübergang.

Die Strömungsrichtungen der beiden Flüssigkeiten werden durch die Anschlüsse an die Rohrleitungen am Gerüst festgelegt.

Sowohl am Eingang und am Ausgang des Bereiches innerhalb des Rohrbündels als auch vor bzw. hinter dem Rohrbündel sind jeweils Halterungen für Thermolemente eingebaut. Somit können die Temperaturen der beiden zu- und abfließenden Flüssigkeitsströme gemessen werden.



Abb.VIII-19: Rohrbündelwärmetauscher

4.2 Versuchsplanung

Durch einen Versuch soll zunächst der Wärmedurchgangskoeffizient des Rohrbündelwärmetauschers ermittelt werden. Die Versuche der einzelnen Gruppen sollen dabei mit unterschiedlichen Einstellungen durchgeführt werden.

- Welche Größen beeinflussen den Wärmestrom beim Wärmedurchgang und welche davon lassen sich mit der vorhandenen Versuchsanordnung verändern?

Besprecht Euren Versuch mit den anderen Gruppen. Legt Eure Parameter zur Durchführung des Versuches fest.

- Welche Größen braucht Ihr zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten?
- Überlegt Euch genau, wie Ihr bei der Versuchsdurchführung vorgehen werdet. Notiert die wichtigsten Schritte in kurzen Sätzen.
- Denkt bereits darüber nach, wie Ihr den Versuch später bewerten wollt.
- Schreibt die Formeln heraus, die Ihr braucht um den Wärmedurchgangskoeffizienten zu berechnen.
- Bereitet Tabellen vor, in die Ihr während der Versuchsdurchführung die Meßwerte eintragt.
- Was braucht Ihr alles zur Versuchsdurchführung?

4.3 Rücksprache vor Versuchsbeginn

Besprecht den Versuch mit dem Lehrer.

Zeigt ihm, wie Ihr den Wärmedurchgangskoeffizienten berechnen wollt, die geplante Vorgehensweise zur Versuchsdurchführung und die geplante Bewertung der Versuchsergebnisse.

4.4 Versuchsdurchführung und -auswertung

Beim Befüllen des Wärmetauschers und der Durchführung der Messungen muß darauf geachtet werden, daß sich der Druck des Wassers im Hausnetz nicht in der Versuchsapparatur aufbaut. Insbesondere der Wärmetauscher ist nicht für diesen Druck ausgelegt.

Das Wasser im Boiler dehnt sich beim Erwärmen aus und muß aus dem Boiler ausfließen können, weil der Boiler kein Druckbehälter ist.

Am Versuchsende muß die gesamte Anlage entleert werden. An der Unterseite des Wärmetauschers sind Absperrventile, die eine Restentleerung ermöglichen. Die Verbindungen zur restlichen Versuchsapparatur sollten gelöst werden, damit die Anschlußstutzen im Deckel offen liegen. Dadurch trocknet der Wärmetauscher auch im Inneren.

Bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten sind als Austauschfläche nur die Rohrflächen zu berücksichtigen.

4.5 Bewertung der Versuche

Seid Ihr mit dem Ergebnis Eurer Arbeit zufrieden?

Beantwortet die folgenden Fragen schriftlich:

- Wie könnt Ihr die Qualität Eurer Messungen überprüfen?
- Was könnt Ihr über die Qualität des Wärmetauschers sagen?
- Mit welchen Einstellungen erhält man die beste Wärmeübertragung?
Begründet weshalb.
- Welche Faktoren konnten zu falschen Ergebnissen führen?
- Versuchskritik und Verbesserungsvorschläge!

5 Was war wichtig?

- Welche Strömungsführung ist zu bevorzugen? Erklärt weshalb.
- Wodurch wird der Wärmedurchgang von einer Flüssigkeit auf die andere beeinflußt?
- Wie verändert sich die Wärmeübertragung bei höheren Volumenströmen? Erklärt weshalb.

6 Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a	Index für "außen"	-
A	Index für ein Ende des Wärmetauschers	-
A	Querschnittsfläche	m^2
B	Index für ein Ende des Wärmetauschers	-
c	Spezifische Wärmekapazität	$J/(kgK)$
d	Rohrdurchmesser	m
i	Index für "innen"	-
U	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2K)$
k	Index für "kalt"	-
l	Länge	m
L	Dicke	m
m	Index für "Mittelwert"	-
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
Q	Wärmeenergie	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
Q_{sd}	Verdampfungswärme	J
Q_{sm}	Schmelzwärme	J
t	Zeit	s
T	Temperatur	K
v	Geschwindigkeit	m/s
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
w	Index für "warm"	-
0	Index für "Anfang"	-
1	Index für "Stoff 1"	-
2	Index für "Stoff 2"	-
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2K)$
Δ	Differenz	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(mK)$
ρ	Dichte	kg/m^3

7 Literaturverzeichnis

- [*Grassmann*] Grassmann, Peter und Widmer, Fritz:
Einführung in die Thermische Verfahrenstechnik
Walter de Gruyter, Berlin · New York 1974
ISBN 3 11 004214 2
- [*Hemming*] Hemming, Werner:
Verfahrenstechnik
Komprath-Reihe
Vogel Fachbuch
ISBN 3-8023-0084-X
- [*Kuchling*] Kuchling, Horst:
Taschenbuch der Physik
Verlag Harri Deutsch 1981
Thun und Frankfurt/Main
ISBN 3 87144 097 3
- [*VDI*] VDI Wärmeatlas Seite Ca 1/ Ca 11
Verein Deutscher Ingenieure
Verfahrenstechnische Gesellschaft des VDI
VDI-Verlag Düsseldorf (1963)
- [*Weast*] Weast, Robert C.:
Handbook of Chemistry and Physics
67th Edition 1986/87
CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida
ISBN 0-8493-0467-9