

S O L A R .
UNI-KASSEL.DE

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Praktikumsskript Solarthermische Komponenten und Systeme

TEIL 5: SOLARSPEICHER

Universität Kassel

Fachbereich Maschinenbau
Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik

Datum: 03.08.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Lernziele	4
2	Grundlagen	4
2.1	Einleitung	4
2.2	Solarspeicher	5
2.3	Wärmeübertrager	7
3	Versuchsaufbau	9
4	Versuchsdurchführung	14
4.1	Speicher A	14
4.2	Speicher B	17
5	Versuchsauswertung	18
5.1	Speicher A	18
5.2	Speicher B	18
	Literaturverzeichnis	19

**Die Durchführung des Versuchs ist nur nach Teilnahme an der
Laborunterweisung und nach dem Lesen der Betriebsanweisung
“Versuchsstand - Solarspeicher“ erlaubt!**

1 Lernziele

- Be- und Entladeverhalten eines Speichers
- Temperaturschichtung im Speicher
- UA-Wert eines Wärmeübertragers in Abhängigkeit von Volumenstrom und Temperatur
- Mathematische Beschreibung einer thermosiphonischen Strömung, Berechnung von Steiggeschwindigkeit und Antriebsdruck

2 Grundlagen

2.1 Einleitung

Wärmespeicher helfen als Systemkomponente die Dynamik der solaren Einstrahlung zu glätten und somit die Solarkollektoren effektiver zu nutzen. Meist fallen solares Energieangebot und Wärmebedarf zeitlich auseinander. Die Spitzenwerte des Warmwasserbedarfs liegen in den Morgen- und Abendstunden, wohingegen das solare Energieangebot mittags am größten ist. Nach einem sonnigen Tag kann ein Regentag folgen. Aus diesen Gründen stellt der Wärmespeicher einen entscheidenden Baustein in thermischen Solaranlagen dar. In einer thermischen Solaranlage wird die Solarstrahlung absorbiert, in Wärmeenergie umgewandelt und über einen Wärmeübertrager in einen Speicher übertragen. Die Entladung des Speichers erfolgt in Abhängigkeit des auftretenden Bedarfs.

Wärmespeicher können gemäß unterschiedlicher Kriterien klassifiziert werden:

- nach der Temperatur in Nieder- ($< 100\text{ °C}$), Mittel-, und Hochtemperaturspeicher ($> 500\text{ °C}$)
- nach Dauer der Wärmespeicherung in Kurz- (1..3 Tage) oder Langzeit-Wärmespeicher bis hin zu saisonalen Wärmespeichern

- nach dem physikalischen Prinzip in sensible (fühlbare), latente und chemische Speicher
- nach dem Speichermedium z.B. in Wasserspeicher, Gesteinsspeicher

Die meisten der heute im Einsatz befindlichen Wärmespeicher zählen zu den Speichern für sensible Wärme, in denen Wärmeenergie über eine Temperaturerhöhung des Mediums gespeichert wird, wobei die Speichermedien Wasser und Gestein dominieren. Speicher für latente Wärme, in denen die Änderung des Aggregatzustandes (Schmelz- oder Verdampfungswärme) eines Mediums genutzt wird, könnten bei Anforderungen an eine hohe Energiedichte bzw. an eine Ein- und Ausspeicherung bei nahezu demselben Temperaturniveau eingesetzt werden. Im Vergleich zur Speicherung sensibler Wärme spielt dieses Speicherprinzip aufgrund wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien derzeit aber nur eine untergeordnete Rolle.

2.2 Solarspeicher

Als eine zentrale Komponente fast jeder thermischen Solaranlage, bietet der Wärmespeicher die Möglichkeit, warmes Wasser auch zu den Zeiten bereitzustellen, an denen nur geringe oder keine Sonneneinstrahlung vorhanden ist. Im Hinblick auf den Verwendungszweck werden Trinkwasserspeicher für Dusche, Bad etc., Heizungs-Pufferspeicher für die Versorgung der Raumheizung und Kombispeicher, die beide Anwendungen ermöglichen, unterschieden. Der Solarspeicher sollte sich durch eine gute Temperaturschichtung, geringe Wärmeverluste, gutes Be- und Endladeverhalten und Korrosionsbeständigkeit der Speichermaterialien auszeichnen. In Tabelle 2.1 werden typische Anwendungsbereiche für Solarspeicher beschrieben.

Zur solarunterstützten Trinkwarmwasserbereitung für Ein- und Zwei-Familienhäuser sind Speicher von 200 bis 500 Liter Fassungsvermögen mit Anschlüssen für zwei Wärmeübertrager üblich: einem unteren für den Anschluss an den Kollektorkreis zur solaren Erwärmung des Wassers und einem oberen für den Anschluss an die Erwärmung durch einen Heizkessel. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte von kaltem und warmem Wasser bildet sich im Speicher eine Temperaturschichtung, indem sich das warme Wasser oben und das kalte Wasser unten im Speicher ansammelt. Diese Trinkwarmwasserspeicher sind in der Regel als Druckspeicher konzipiert und für den normalen Druck des öffentlichen Trinkwassernetzes (0,4 bis 0,6 MPa) ausgelegt.

Tabelle 2.1: Anwendungsbereiche für Solarwärmespeicher

Anwendung	Speichertyp	Speicher- dauer Tage	Speicher- volumen m³	Tem- peratur °C	Speicher- kosten ca.* EUR/m³	Anteilige Energie- einsparung %	Markt- verbrei- tung
Trinkwasser- erwärmung im Einfamilienhaus	Bivalenter Trinkwasser- speicher	< 3	0,2..0,5	< 95	3000	< 70% vom Warmwasser- bedarf	sehr hoch
Trinkwasser- erwärmung im Mehrfamilienhaus, Krankenhaus, etc.	Einzel Speicher/ Kaskade	< 3	3..30	< 95	700 bis 1500	< 50% vom Warmwasser- bedarf	Gering
Kombianlage im Einfamilienhaus	Kombispeicher/ Puffer+Frisch- wasserstation	< 7	0,8..2	< 95	1500 bis 2000	< 30%	sehr hoch
	Kaskade	< 30	2..10	< 95	1300	30..70%	gering
Kombianlage im Mehrfamilienhaus	Einzel Speicher/ Kaskade		5..30	< 95	1300	< 20 %	gering
Solarunterstützte Nahwärme	Erdreichwasser/ Kies-Wasser/ Erdsonde	< 120	1.000 bis 100.000	< 90 < 80 < 70	350	20..50%	sehr gering
Solare Prozeßwärme	Einzel Speicher/ Kaskade	< 10	3...100	< 95	700 bis 1500	0,1..10%	sehr gering

*Nettopreise, mit Einbauten, ohne Montage

Sobald aus dem oberen Bereich des Speichers warmes Wasser entnommen wird, strömt unten kaltes Wasser nach. Innerhalb des Speichers sollte sich dabei möglichst eine gute Temperaturschichtung einstellen und auch erhalten bleiben. Die Temperaturschichtung ist umso ausgeprägter, je schlanker und höher der Speicher ist. Stehende Speicher sollten ein Höhen-Durchmesser-Verhältnis von mindestens 2,5:1 aufweisen. Der Temperaturausgleich zwischen den Schichten ist bei schlanken Speichern außerhalb der Ladezeiten gering.

Um heißes Wasser sofort nutzen zu können, ohne dass erst das komplette Volumen des Speichers erwärmt werden muss, wurden für die Beladung von Solarspeichern (Speicherinhalte > 250 l) besondere Vorrichtungen (Prallplatten, Steigrohr) entwickelt. Ei-

ne selbstregelnde Ladevorrichtung (Steigrohr) kann hierbei für eine Einschichtung von Wasser variabler Temperatur in unterschiedlichen Höhen sorgen. Dadurch entsteht eine gute Temperaturschichtung innerhalb des Speichers: heißes Wasser oben (schnelles Erreichen der Nutztemperatur), warmes Wasser darunter, kaltes Wasser unten (hoher Kollektorwirkungsgrad). Durch Schichtenbeladung wird der Temperaturniveauperlust bei der Durchströmung kälterer Schichten vermieden, die Durchmischung des Speichers weitgehend unterbunden und ggf. die Einschaltfrequenz der Nachheizung deutlich verringert.

Neben einer guten Temperaturschichtung sollten die Wärmeverluste durch eine ausreichende Dämmung und sinnvolle Konstruktion (geringes Oberflächen-Volumenverhältnis, Vermeidung von Wärmebrücken wie unisolierte Flansche) möglichst gering gehalten werden.

2.3 Wärmeübertrager

Zur Übertragung der solar gewonnenen Wärme an das Trinkwasser ist in Zweikreissystemen ein Wärmeübertrager erforderlich. Auf der Primärseite des Wärmeübertragers fließt das Wärmeträgerfluid (meist ein Wasser-Glykol-Gemisch), auf der Sekundärseite befindet sich das zu erwärmende Wasser. Soll ein Wärmestrom von Primär- zur Sekundärseite fließen, ist eine Temperaturdifferenz erforderlich. Je größer diese Differenz ist, desto höher ist auch die Wärmeübertragungsleistung.

Bei Wärmeübertragern (WÜT) kann grundsätzlich zwischen internen WÜT und externen WÜT unterschieden werden. Bei internen WÜT kommen häufig Rohrwendelwärmeübertrager zum Einsatz, wobei die Rohrschlangen entweder aus glattwandigem oder geripptem Kupfer- oder Edelstahlrohr bestehen. Während Glattrohrwärmeübertrager wegen der hohen erforderlichen Rohrlänge meistens werksseitig fest eingebaut sind, können Rippenrohrwärmeübertrager durch die kompaktere Konstruktion mittels spezieller Flansche oft auch noch nachträglich in den Speicher eingesetzt werden. Glattwandige Wärmeübertrager besitzen eine höhere Wärmeübertragungsleistung pro Quadratmeter Übertragerfläche als gerippte und sind weniger durch Verkalkung gefährdet. Allerdings benötigen sie aufgrund größerer Rohrlängen im Speicher mehr Platz. Als Faustformel für die Dimensionierung von internen Wärmeübertragern kann bei Verwendung von glattwandigen (bzw. gerippten) Rohren eine Fläche von $0,20 \text{ m}^2$ (bzw. $0,35 \text{ m}^2$) Übertragungsfläche pro m^2 Kollektorfläche angenommen werden.

In externen Wärmeübertragern (Platten- oder Rohrbündelwärmeübertrager) werden zwei

Fluidströme aneinander vorbeigeführt, wobei sie dabei jedoch stofflich voneinander getrennt sind. Externe Wärmeübertrager bieten gegenüber internen den Vorteil, dass sie mehrere Speicher beladen können und wegen der höheren Strömungsgeschwindigkeiten beider Fluide eine höhere Wärmeübertragungsleistung¹ besitzen. Nachteilig sind der höhere Anschaffungspreis und die Notwendigkeit einer zusätzlichen sekundärseitigen Pumpe.

Die an der Wärmeübertragung beteiligten Fluidströme können auf verschiedene Weise geführt werden. Bei Gleichstrombetrieb strömen das heiße und kalte Fluid in gleicher Richtung, bei Gegenstrombetrieb in entgegengesetzter Richtung und bei Kreuzstrombetrieb orthogonal zueinander.

Entlang der Übertragungsfläche A kühlt sich das heiße (primärseitige) Fluid von der Eintrittstemperatur T_h auf die Austrittstemperatur T_h' ab. Im Wärmeübertrager wird das kalte (sekundärseitige) Fluid von der Eintrittstemperatur T_c auf die Austrittstemperatur T_c' erwärmt. Wird das Gegenstromprinzip angewendet, so tritt das kalte Fluid mit der Temperatur T_c am Ende der Heizfläche, wo sich der primäre Austritt befindet, ein und mit erhöhter Temperatur T_c' am Anfang der Heizfläche aus. Beim Gegenstrombetrieb kann mehr Wärmeenergie vom warmen aufs kalte Fluid übertragen werden (Abb. 2.1).

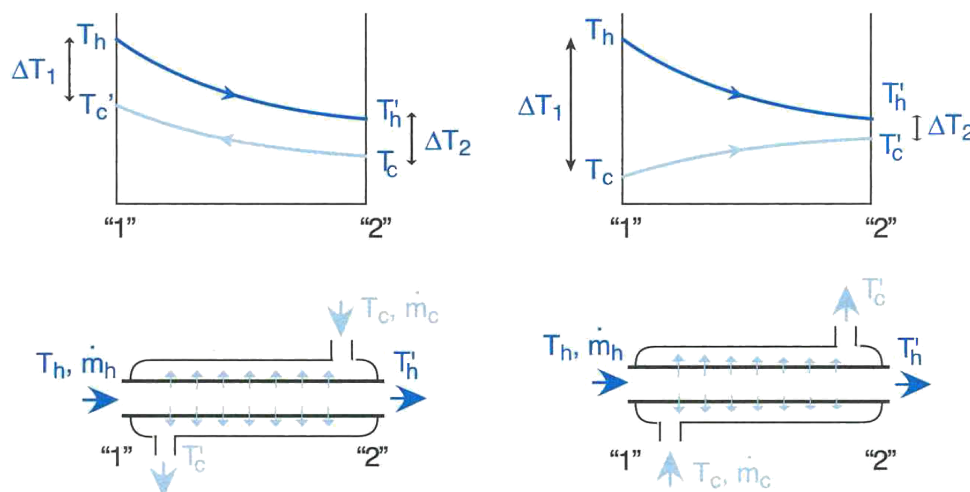


Abbildung 2.1: Fluidtemperaturen in einem Doppelrohr-Wärmeübertrager links: Gegenstromführung, rechts: Gleichstromführung, aus (Polifke & Kopitz, 2009), S. 171

Der Vorgang der Wärmeübertragung setzt sich aus dem Wärmeübergang an der einen

¹Bei internen Wärmeübertragern ist die Übertragungsleistung durch die freie Konvektion des Speicherwassers am Wärmeübertragerrohr begrenzt.

Seite der Trennwand, der Wärmeleitung durch die Trennwand und dem Wärmeübergang an der anderen Seite der Trennwand zusammen. Er wird Wärmedurchgang genannt und durch folgende Gleichung beschrieben.

$$d\dot{Q} = U \cdot dA (T_{h'} - T_{c'}) = U \cdot dA \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Der Wärmestrom $d\dot{Q}$, der durch das Flächenelement dA hindurchtritt, ist also zu der Fläche und der Temperaturdifferenz proportional. Der Proportionalitätsfaktor ist der Wärmedurchgangskoeffizient U in $W/(m^2K)$, der die Einzelvorgänge des Wärmedurchgangs beinhaltet. Aus der Integration über die gesamte wärmeübertragende Fläche A ergibt sich die Wärmeleistung (Gl. 2.2).

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (2.2)$$

Die mittlere Temperaturdifferenz ΔT_m lässt sich wie folgt bestimmen (Gl. 2.3):

$$\Delta T_m = \frac{|\Delta T_0 - \Delta T_1|}{\ln \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_1} \right)} \quad (2.3)$$

mit: $\Delta T_0 = T_h - T_{c'}$ und $\Delta T_1 = T_{h'} - T_c$ (für Gegenstrom-WÜT).

Es handelt sich hier um den logarithmischen Mittelwert der örtlichen Temperaturdifferenzen. Im Grenzfall $\Delta T_0 \rightarrow \Delta T_1$ geht der logarithmische Mittelwert in den arithmetischen Mittelwert über:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_0 + \Delta T_1}{2} = \Delta T_0 = \Delta T_1 \quad (2.4)$$

Sind die übertragene Wärmeleistung \dot{Q} und die mittlere Temperaturdifferenz ΔT_m bekannt, so kann die Kenngröße des Wärmeübertragers nach Gl. 2.5 ermittelt werden.

$$UA = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_m} \quad (2.5)$$

3 Versuchsaufbau

Der Versuchsstand umfasst die beiden Speicher A und B, die Hydraulik und die Messdatenerfassung. Als Speichermedium wird Wasser eingesetzt. Da die Speicher aus Glas gefertigt sind, können Strömungsvorgänge innerhalb der Speicher beobachtet werden. Die Abbildungen 3.1 und 3.2 zeigen den Versuchsaufbau.

Speicher A hat im Boden drei unterschiedliche Zuläufe: einen Bodeneinlass, einen Einlass mit Prallplatte und ein Schichtbelade-Steigrohr. Über diese Zuläufe kann der Speicher



Abbildung 3.1: Versuchsaufbau - Hydraulik

aus der Kaltwasser-Leitung des Labors befüllt werden. Die Temperierung des zulaufenden Wassers erfolgt über einen Heizkreis, der mit Hilfe eines elektrischen Heizers (6 kW) erwärmt wird. Die Wärme kann dann in einem externen Plattenwärmeübertrager vom Heizkreis (Primärkreis) auf das zulaufende Wasser (Sekundärkreis) übertragen werden. Die Vorgabe des Temperatur-Sollwertes sowie die Temperatur-Regelung erfolgt mit einem PID-Regler. Mithilfe von bis zu 20 Temperatursensoren, die an einer Temperatur-Messlanze im Abstand von jeweils 6 cm angebracht sind, kann die sich einstellende Temperaturschichtung innerhalb des Speichers erfasst und zeitgleich auf dem Monitor des Laptops beobachtet werden. Abbildung 3.3 zeigt das Hydraulik-Schema des Versuchsaufbaus.

Speicher B besitzt einen internen Rohrbündel-Wärmeübertrager, der mit einem thermosiphonischen Steigrohr verbunden ist. In Abb. 3.4 wird die thermosiphonische Strömung, bzw. die Beladung des Speichers veranschaulicht.

Während der Speicherbeladung wird zunächst das Speicherwasser innerhalb des durchsichtigen Kunststoff-Kastens erwärmt. Das erwärmte Speicherwasser steigt dann aufgrund seiner verminderten Dichte (im Vergleich zum Speicherwasser in der Umgebung des Kas-



Abbildung 3.2: Versuchsaufbau (links: Speicher A, rechts: Speicher B)

tens) durch ein Acrylglasrohr (Durchmesser = 16 mm, Länge = 730 mm) in den oberen Speicherbereich und belädt so den Speicher.

Die Einsicht-Einrichtung besteht aus dem Acrylglasrohr mit einer Abdeckscheibe sowie vier Ovallöchern. Mit dieser Konstruktion wird das nach oben strömende Wasser in die Horizontale umgelenkt. So wird vermieden, dass das erwärmte Speicherwasser direkt in die obersten Speicherschichten strömt und sich mit diesen vermischt (falls der Speicher noch höher wäre und z.B. eine Nachheizung besitzen würde).

In Kreisläufen, die durch Dichteunterschiede eines Fluids angetrieben werden, sind Temperaturverteilung und Reibung (Druckabfall) entlang eines Strömungskanals die maßgeblichen Größen.

Mit einem eindimensionalen Ansatz ergibt sich der Antriebsdruck Δp_{driv} für die Zirkulation des Speicherwassers jeweils durch Integration der Dichteverteilung entlang des Kreislaufes. Der Antriebsdruck setzt sich aus den beiden Dichteintegralen der senkrecht verlaufenden kommunizierenden Wassersäulen (WS) im und parallel zum Strömungskanal

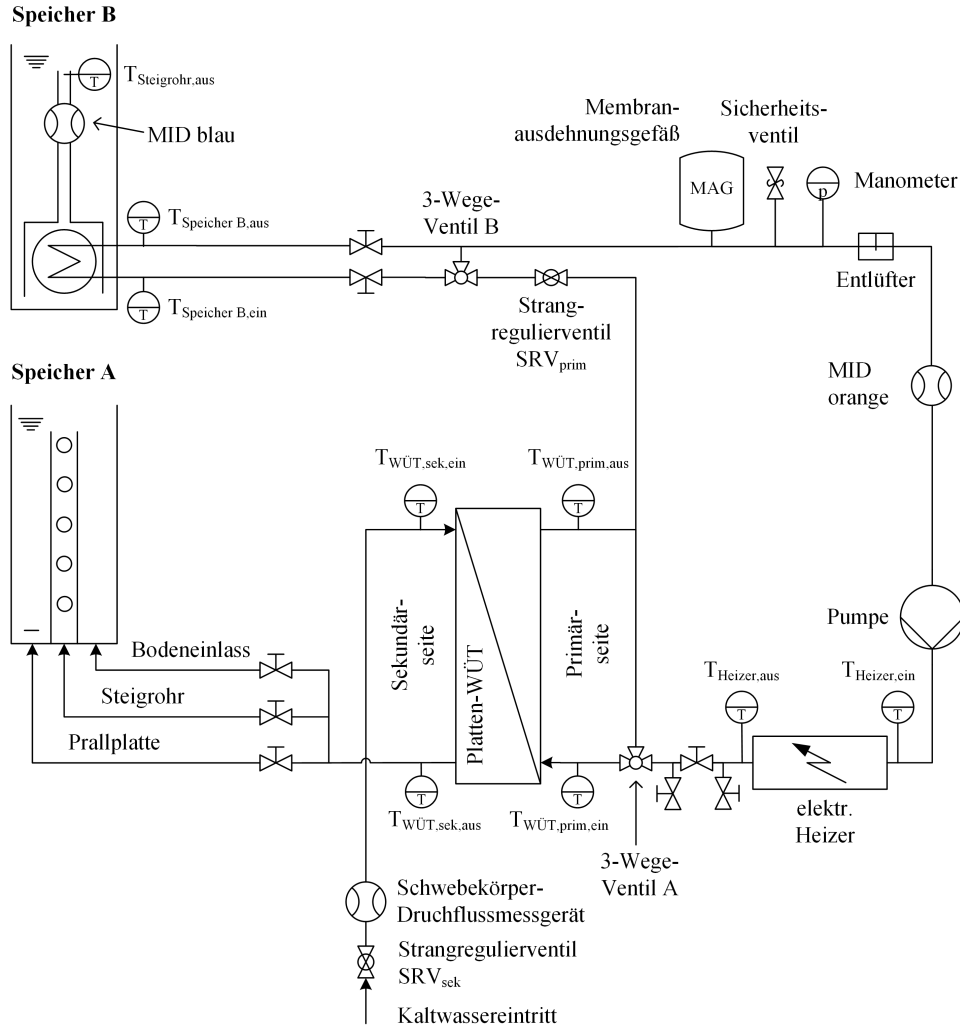


Abbildung 3.3: Hydraulik-Schema

zusammen.

$$\Delta p_{\text{drive}} = g \left| \int_{h_1}^{h_2} \rho (T_{WS1}) dh' - \int_{h_1}^{h_2} \rho (T_{WS2}) dh' \right| \quad (3.1)$$

Hier ist Δp_{drive} der Antriebsdruck in Pa, $T_{WS1,2}$ die Temperatur der Wassersäule 1 bzw. 2 in K, ρ die Dichte in kg/m^3 und $g=9,81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung.

Im Gleichgewicht entspricht der Antriebsdruck dem Druckverlust des entlang des Kreislaufes strömenden Fluids durch Reibungskraft (Scherkräfte). Für die Druckbilanz gilt somit:

$$\Delta p_{\text{drive}} = \Delta p_{\text{shear}} = \zeta \frac{\bar{\rho}_{WS1}}{2} v_{\text{pipe}}^2 \quad (3.2)$$

Mit dem Reibungsdruckabfall Δp_{shear} in Pa, dem Druckverlustkoeffizient ζ und der Fluid-

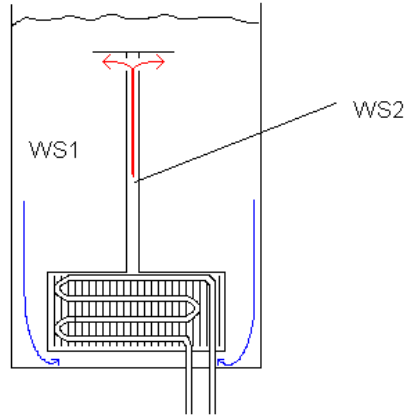


Abbildung 3.4: Veranschaulichung der thermosiphonischen Strömung

geschwindigkeit im Steigrohr v_{pipe} in m/s.

Da die Geschwindigkeit des Speicherwassers außerhalb des Strömungskanals gegenüber derjenigen innerhalb des Strömungskanals vernachlässigt werden kann, erfolgt der Druckabfall der Speicherwasserzirkulation überwiegend im Strömungskanal (Steigrohr und Wärmeübertrager-Kasten) und ist maßgeblich durch den Steigrohrdurchmesser (16 mm) mitbestimmt.

Der Druckverlustkoeffizient ζ berechnet sich wie folgt:

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 = \zeta_0 + \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \cdot \frac{h_{\text{pipe}}}{d_{\text{pipe}}} \quad (3.3)$$

$$\text{mit } \zeta_0 = 1,44 \quad \text{und} \quad Re = \frac{\rho \cdot v_{\text{pipe}} \cdot d_{\text{pipe}}}{\eta} \quad .$$

Hierbei ist Re die Reynoldszahl (einheitenlos), ρ die Dichte des Wassers in kg/m^3 , η die dynamische Viskosität in $\text{Pa}\cdot\text{s}$, d_{pipe} der Durchmesser des Steigrohrs (16 mm) und h_{pipe} die Höhe des Steigrohres (ca. 730 mm).

Die Gleichung lässt sich somit nicht ohne Weiteres nach der Geschwindigkeit im Steigrohr v_{pipe} auflösen. Mithilfe einer Nullstellensuche (z.B. mit Excel) kann sie jedoch einfach bestimmt werden. Dabei wird v_{pipe} in der Gleichung solange variiert, bis folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\Delta p_{\text{drive}} - \Delta p_{\text{shear}} = 0. \quad (3.4)$$

4 Versuchsdurchführung

4.1 Speicher A

1. Vorbereitung

- (a) Drehen Sie den grünen Kaltwasser-Hahn am Waschbecken vollständig auf und lassen Sie für ca. 5 Minuten das Kaltwasser in das Waschbecken laufen. Hiermit stellen Sie sicher, dass die Kaltwasser-Leitung durchspült wird und während des Versuchs eine konstante Wassertemperatur zur Verfügung steht.
- (b) Prüfen Sie währenddessen, ob sich die Temperatur-Messlanze in Speicher A befindet. Falls nicht, geben Sie dem Laboringenieur Bescheid, der für Sie die Messlanze umsetzt.
- (c) Schalten Sie den Agilent-Datenlogger und das Notebook ein und starten Sie das Messprogramm "PRAKTIKUM_Solarspeicher".

2. Aufheizung des Primärkreislaufts

- (a) Stellen Sie die beiden 3-Wege-Ventile so ein, dass der Platten-WÜT durchströmt wird und Speicher B abgesperrt ist.
- (b) Stellen Sie die Pumpe des Primär-Kreislaufs (Kreislauf der Wärmequelle) auf die höchste Stufe (Stufe III am kleinen Drehschalter an der Pumpe) und schalten Sie die Pumpe ein.
- (c) Regeln Sie den Volumenstrom im Primärkreislauf mit Hilfe des Strangregulierventils SRV_prim auf 90 l/h ein.
- (d) Stellen Sie am PID-Regler des Heizers eine Soll-Temperatur von 60 °C ein und schalten Sie den Heizer ein. Die Temperatur nach dem Heizer $T_{\text{Heizer,aus}}$ wird nun auf die Soll-Temperatur geregelt.

3. Befüllung bis zur 30 Liter-Markierung

- (a) Öffnen Sie im Sekundärkreis den Bodeneinlass für Speicher A.
- (b) Schließen Sie den Einlass der Schichtladelanze sowie den Einlass der Prallplatte.

- (c) Drehen Sie dann den grünen Kaltwasser-Hahn am Waschbecken vollständig auf und öffnen Sie den roten Kugelhahn direkt unter dem Wasserhahn.
- (d) Wenn $T_{W\ddot{U}T,prim,ein}$ die Soll-Temperatur erreicht hat, öffnen Sie langsam das Strangreguliertventil SRV_{sek} links neben dem Platten-WÜT und stellen Sie den sekundären Volumenstrom (Hausleitungs-Kaltwassernetz) auf ca. 120 l/h ein. Nutzen Sie hierfür den Schwebekörper-Durchflussmesser.

Das Wasser durchströmt nun den Platten-WÜT, wird dort erwärmt und tritt über den Bodeneinlass in Speicher A ein.

- (e) Beobachten Sie nun die Temperatur $T_{W\ddot{U}T,sek,aus}$ am Austritt des Platten-WÜT die nun eine Temperatur von ca. 45 °C erreichen sollte.
- (f) Bei Erreichen der 30 Liter-Markierung an Speicher A stoppen Sie die Befüllung durch Schließen des roten Kugelhahns in der Zulaufleitung am Waschbecken.
- (g) Schalten Sie die Heizung und die Pumpe aus.
- (h) In der späteren Auswertung sollen Sie die in diesem Versuchsteil erfassten Messdaten zur Bestimmung des UA-Wertes für den Platten-WÜT nutzen. Achten Sie also auf einen möglichst stationären Betrieb.

4. Befüllung bis zur 50 Liter-Markierung

- (a) Schließen Sie den Bodeneinlass und öffnen Sie den Einlass der Prallplatte.
- (b) Befüllen Sie Speicher A mit kaltem Wasser durch Öffnen des roten Kugelhahns unter dem Wasserhahn.
- (c) Beobachten Sie am Monitor die Temperaturen in Speicher A. Entsteht evtl. eine Schichtung?
- (d) Schließen Sie bei Erreichen der 50 Liter-Markierung den roten Kugelhahn in der Zulaufleitung am Waschbecken und warten Sie 2 Minuten bis sich die Temperaturwerte der Messlanze in Speicher A scheinbar stationär verhalten.

5. Befüllung bis zur 60 Liter-Markierung

- (a) Schließen Sie im Sekundärkreis den Einlass der Prallplatte und öffnen Sie erneut den Bodeneinlass.
- (b) Befüllen Sie nun den Speicher A mit 10 l kaltem Wasser bis zur nächsten Markierung. Bleibt eine evtl. vorhandene Schichtung bestehen oder wird Sie gestört?
- (c) Schließen Sie den roten Kugelhahn in der Zulaufleitung am Waschbecken bei Erreichen der 60 Liter-Markierung.
- (d) Warten Sie bis sich die Temperaturwerte der Messlanze in Speicher A scheinbar stationär verhalten.

6. Befüllung bis zur 70 Liter-Markierung

- (a) Schließen Sie den Bodeneinlass und öffnen Sie den Einlass des Solvis-Steigrohres (Schichtladelanze).
- (b) Befüllen Sie nun den Speicher A mit 10 Liter kaltem Wasser durch Öffnen des roten Kugelhahns am Waschbecken.
 - Was beobachten Sie nachdem sich das Steigrohr komplett gefüllt hat?
 - Welche Klappen müssen sich logischerweise öffnen?
 - Beobachten Sie zeitgleich die Temperaturwerte der Messlanze.
- (c) Bei Erreichen der 70 Liter-Markierung stoppen Sie die Befüllung durch Schließen des roten Kugelhahns am Waschbecken.

7. Befüllung bis zur 80 Liter-Markierung

- (a) Schalten Sie nun die Pumpe des Primär-Kreislaufes ein.
- (b) Schalten Sie die Heizung wieder ein und warten Sie bis die Temperatur $T_{W\ddot{U}T,prim,ein}$ ca. 60 °C erreicht hat.
- (c) Öffnen Sie dann den roten Kugelhahn am Waschbecken und befüllen Sie den Speicher A bis zu der 80 Liter-Markierung mit warmem Wasser.
- (d) Beobachten Sie, welche Klappen sich öffnen. Beobachten Sie die Temperaturwerte der Messlanze.

- (e) Bei Erreichen der 80 Liter-Markierung schließen Sie den roten Kugelhahn in der Zulaufleitung am Waschbecken und den grünen Wasserhahn.
- (f) Stellen Sie die Heizung und die Pumpe aus.
- (g) Warten Sie bis sich die Temperatur-Werte der Messlanze in Speicher A scheinbar stationär verhalten.
- (h) Stoppen Sie die Messdatenerfassung und speichern Sie Ihre Daten ab.

4.2 Speicher B

1. Vorbereitung

- (a) Geben Sie dem Laboringenieur Bescheid, damit er die Messlanze von Speicher A in den Speicher B setzt.
- (b) Stellen Sie beide 3-Wege Ventile so ein, dass der Platten-WÜT umgangen wird und Speicher B beladen werden kann.
- (c) Starten Sie erneut die Messdatenerfassung.
- (d) Lassen Sie sich am Monitor den Durchfluss im Steigrohr von Speicher B anzeigen (MID_{blau}).

2. Beladung von Speicher B

- (a) Stellen Sie die Pumpe auf die größte Leistung (Drehshalter an der Pumpe auf Stufe III).
- (b) Stellen Sie am PID-Regler eine Soll-Temperatur von 60 °C ein und schalten Sie den Heizer im Primärkreis ein.
- (c) Warten Sie ca. 10 bis 15 Minuten ab und beobachten Sie die Vorgänge im Speicher und Steigrohr.
 - Nach ca. 10 Minuten bilden sich erste Schlieren am Austritt des thermosiphonischen Steigrohres.
 - Nach ca. 15 Minuten sollten scheinbar stationäre Verhältnisse herrschen d.h. die Sekundärströmung in Speicher B (thermosiphonische Strömung) ist relativ konstant geworden. Beurteilen Sie dies anhand der Messdaten vom MID_{blau} .

- (d) Stellen Sie die Soll-Temperatur am PID-Regler nun auf 45 °C .
- (e) Warten Sie ca. 15 Minuten ab, bis die thermosiphonische Strömung im Steigrohr stationär erscheint.
- (f) Stellen Sie dann die Soll-Temperatur zurück 60 °C .
- (g) Warten Sie erneut ca. 15 Minuten ab bis sich wieder ein anscheinend stationärer Zustand eingestellt hat.
- (h) Stellen sie die Heizung und die Pumpe aus.
- (i) Stoppen Sie die Messdatenerfassung und speichern Sie Ihre Daten ab.

5 Versuchsauswertung

5.1 Speicher A

1. Berechnen Sie den UA-Wert des Platten-Wärmeübertragers.
2. Beschreiben Sie ihre Beobachtungen beim Befüllvorgang und interpretieren Sie diese.

5.2 Speicher B

- Berechnen Sie den UA-Wert des internen Rohrbündel-Wärmeübertragers in Speicher B.
- Ermitteln Sie mithilfe der Energiebilanz am Wärmeübertrager den Volumenstrom im Steigrohr und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Messwert von MID_{blau} (MID_{blau} zeigt 8 % zu viel an).
- Berechnen Sie den Antriebsdruck über die Dichteintegrale mithilfe der gemessenen Temperaturen und schließen Sie daraus wiederum auf den thermosiphonischen Volumenstrom im Steigrohr.
- Diskutieren Sie die Abweichungen zwischen den drei vorliegenden Werten für den Volumenstrom im Steigrohr.
- Wann kommt die thermosiphonische Strömung prinzipiell zum Stillstand?

Literaturverzeichnis

POLIFKE, W., & KOPITZ, J. 2009. *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. Pearson Studium. 2. Auflage.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Fluidtemperaturen in Doppelrohr-Wärmeübertragern	8
3.1	Versuchsaufbau - Hydraulik	10
3.2	Versuchsaufbau (links: Speicher A, rechts: Speicher B)	11
3.3	Hydraulik-Schema	12
3.4	Veranschaulichung der thermosiphonischen Strömung	13

Tabellenverzeichnis

2.1	Anwendungsbereiche für Solarwarmespeicher	6
-----	---	---