

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

Thermische Messtechnik

TEIL 2: DURCHFLUSSMESSUNG

Universität Kassel
Fachgebiet Maschinenbau
Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik

Datum: 03.08.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Durchflussmessung.....	2
1.1	Mengenmesser / Volumenzähler	3
1.1.1	Unmittelbare Verfahren	3
1.1.2	Mittelbare Verfahren.....	5
1.2	Durchflussmesser	8
1.2.1	Volumendurchfluss	9
1.3	Auswahlkriterien	13
2	Versuchsaufbau	14
3	Versuchsbeschreibung	16
4	Versuchsdurchführung.....	17
4.1	Versuch 1: Durchfluss-Messung	17
4.2	Versuch 2: Laufzeit-Verfahren.....	18
5	Versuchsauswertung.....	19
5.1	Versuch 1	19
5.2	Versuch 2	19

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

Lernziele

- Erlernen verschiedener Verfahren zur Durchflussmessung
- Durchführung von Durchflussmessungen mit unterschiedlichen Sensoren
- Betrachtung der Genauigkeit verschiedener Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien und den daraus resultierenden Anwendungsgebieten

1 Grundlagen der Durchflussmessung

Durchfluss bezeichnet das Verhältnis aus der Menge des strömenden Mediums und der Zeit, in der diese Menge einen Leitungsquerschnitt durchfließt. Der Durchfluss wird je nach Definition der Menge in Volumeneinheiten oder in Masseneinheiten angegeben. Massenstrom und Volumenstrom sind über die Dichte miteinander verknüpft. Da Viskosität und Dichte vieler Medien auch von anderen Randbedingungen wie z. B. Temperatur und Druck abhängen, müssen für eine korrekte Volumenstrombestimmung diese Größen ggf. zusätzlich erfasst werden. Es existiert eine Vielzahl von Verfahren zur Bestimmung des Durchflusses, von denen im Folgenden eine Auswahl vorgestellt wird.

Jedes Verfahren zur Durchfluss- und Mengenmessung weist spezifische Eigenschaften auf, die es für bestimmte Anwendungen prädestiniert. Die wichtigsten Verfahren sind in Abbildung 1 dargestellt.

Bei der Durchflussmessung in geschlossenen Rohrleitungen werden Mengen- und Durchflussmesser unterschieden. Mengenumesser, auch Volumenzähler genannt, sind Geräte die Teilvolumina des zu messenden Stroms abgrenzen, erfassen und zu einem Gesamtvolumen integrieren. Durchflussmesser arbeiten mit indirekten Methoden der Messwertbildung. Dies erfolgt z.B. über die Erfassung der Fließgeschwindigkeit oder über die Ermittlung der kinetischen Energie.

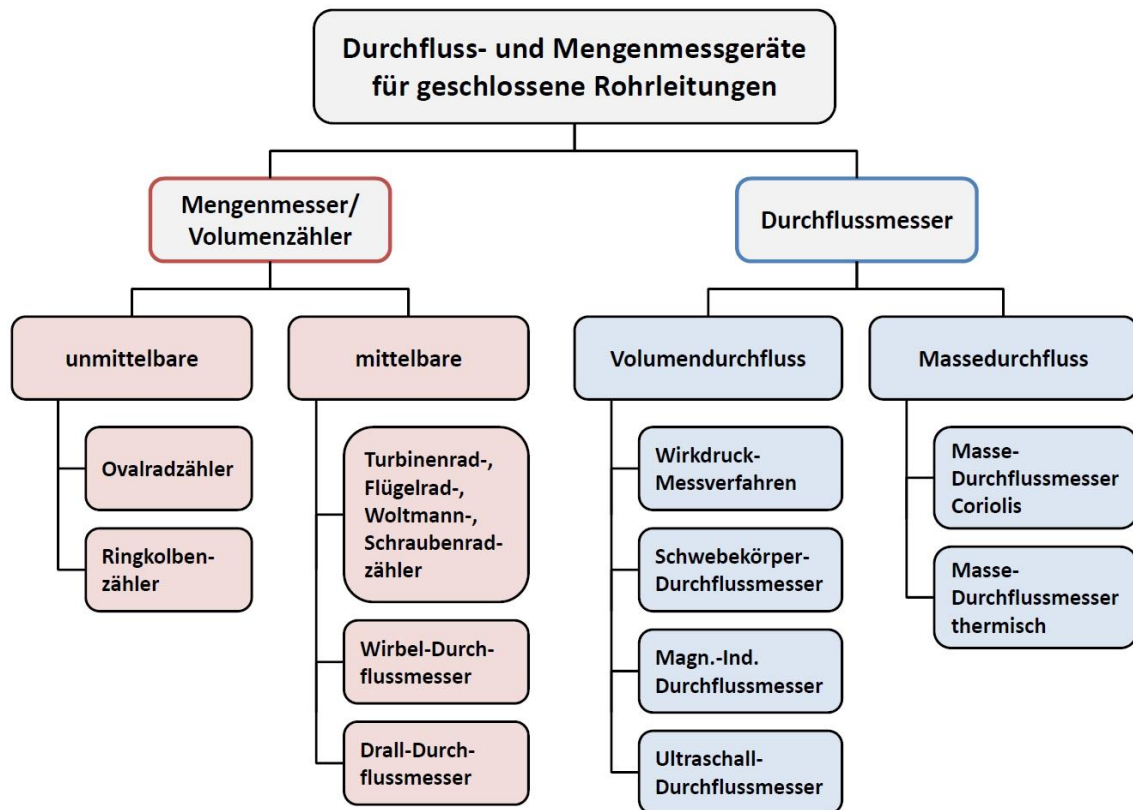


Abbildung 1: Einteilung der Durchfluss- und Mengenmessgeräte (Hogrefe, 1994, S. 24)

1.1 Mengensmesser / Volumenzähler

Bei den erhältlichen Mengensmessern wird zwischen mittelbaren und unmittelbaren Verfahren unterschieden. Unmittelbare Volumenzähler verfügen über bewegliche Messkammern mit eindeutig definierten Volumen, die durch das Fluid angetrieben werden. Zu diesen Verfahren zählen Ovalrad-, Ringkolben- und Drehkolbenzähler.

Zu den mittelbaren Volumenzählern gehören Volumenzähler mit Messflügel (auch als Turbinenzähler bezeichnet) sowie die Volumenzähler mit erzwungenen Strömungsänderungen. Bei diesem Verfahren werden Zählimpulse erzeugt, die ein bestimmtes Teilvolumen repräsentieren, welches in diesem Falle allerdings nicht abgegrenzt ist.

1.1.1 Unmittelbare Verfahren

Ein großer Vorzug von Verdrängungszählern besteht in der Möglichkeit zur genauen Messung pulsierender Strömungen. Messfehler treten hauptsächlich durch Spaltverluste, also Undichtigkeiten zwischen festen und beweglichen Messkammerwänden auf. Die Viskosität des Fluids spielt hierbei eine maßgebliche Rolle. Durch Verschleiß des Materials werden die

Spaltverluste größer, womit im Laufe der Zeit die Durchflussmengen unterschätzt werden. Alle Verdrängungszähler sind aufgrund des geringen Spiels zwischen beweglichen und festen Messkammerwänden schmutzempfindlich. Eine sorgfältige Filterung des Fluid ist daher zwingend erforderlich. Gaseinschlüsse müssen durch Gasabscheider beseitigt werden.

Ovalradzähler

Das Messelement dieses Messgerätes besteht aus zwei verzahnten Ovalrädern. Die antreibende Flüssigkeit erzeugt je nach Stellung der Ovalräder unterschiedlich angreifende Drehmomente, die die Räder aufeinander abrollen lassen. Abbildung 2 stellt diesen Ablauf dar. Durch die Rotation entsteht unter dem unteren Ovalrad ein abgeschlossenes sichelförmiges Volumen, das in der Folge zum Geräteausgang geschoben wird. Somit transportiert jede Umdrehung des Ovalradpaares ein definiertes Flüssigkeitsvolumen.

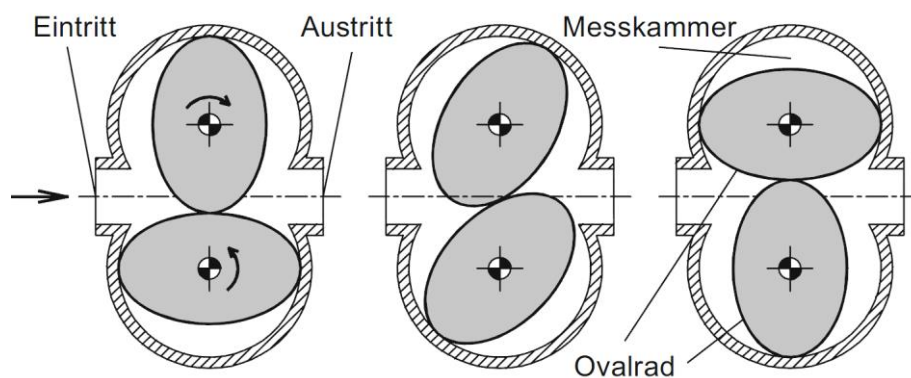


Abbildung 2: Funktionsprinzip eines Ovalradzählers (Böckh & Saumweber, 2013)

Ringkolbenzähler

Den grundsätzlichen Aufbau des Ringkolbenzählers zeigt Abbildung 3. In einem zylindrischen Gehäuse wird ein Hohlzylinder (Ringkolben) exzentrisch zum Umlauf gebracht. Der Kolben ist im Führungzapfen gelagert und mit seinem Schlitz an der Trennwand geführt. Zunächst wird das Innere des Kolbens gefüllt und der Kolben dreht sich, bis das Volumen V_1 gefüllt ist. Während das Innere des Kolbens entleert wird, füllt sich das Volumen außerhalb des Kolbens und der Kolben dreht sich, bis das Volumen V_2 gefüllt ist. Das Volumen V_2 wird geleert, wenn V_1 wieder gefüllt wird.

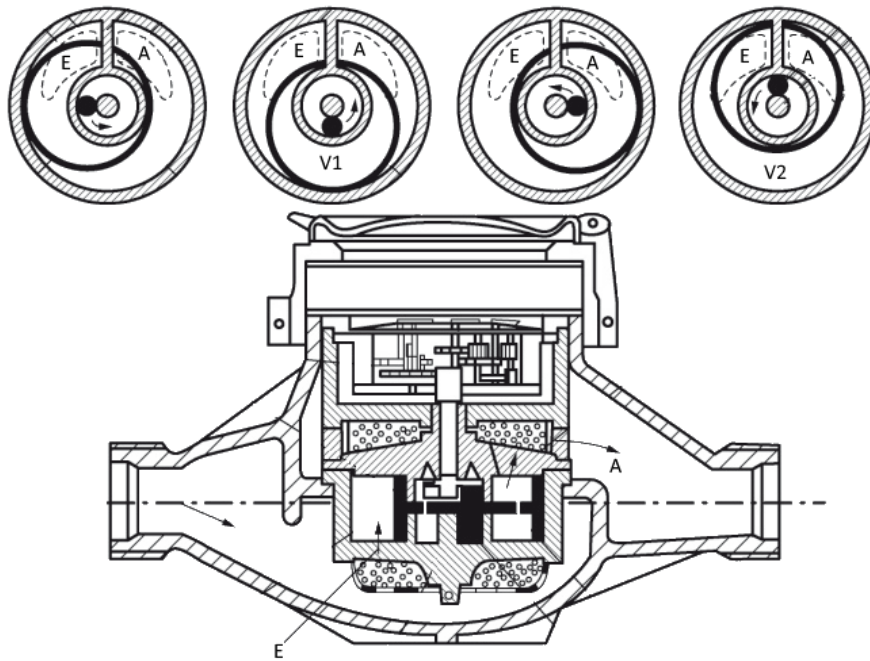


Abbildung 3: Funktionsprinzip des Ringkolbenzählers (Hoffmann, 2013)

Da der Messvorgang beim Vorwärts- und beim Rückwärtsströmen in der gleichen Weise abläuft, arbeiten Ringkolbenzähler in beiden Strömungsrichtungen mit der gleichen Messgenauigkeit. Ringkolbenzähler werden besonders bei Hauswassermessungen eingesetzt, wenn die Genauigkeit von Woltmann- und Flügelradzählern (s.u.) nicht ausreicht. Diese Zählerbauart eignet sich besonders für kleine Durchflüsse und hohe zu erzielende Messgenauigkeiten.

1.1.2 Mittelbare Verfahren

Mittelbare Volumenzähler erfassen Hilfsgrößen, die dem Volumenstrom proportional sind. Durch eine geeignete Kalibrierung dieser Geräte wird anhand der ermittelten Hilfsgrößen der Volumenstrom bestimmt. Diese Hilfsgrößen sind in der Regel Drehbewegungen von Laufrädern die durch die Strömung hervorgerufen werden oder eine definierte Wirbelbildung in der Strömung.

Turbinenzähler (Flügelrad- und Woltmannzähler)

Das Messelement bei diesem Verfahren ist ein drehbar gelagertes Turbinenrad, welches durch die Strömung in Rotation versetzt wird (siehe Abbildung 4). Zwischen dessen Drehzahl und der Strömungsgeschwindigkeit besteht ein linearer Zusammenhang, sodass Drehzahl und Durchfluss proportional sind. Dies gilt jedoch nur für einen begrenzten Messbereich, da Lagerreibung, nichtlineare Beziehungen zwischen Strömungsprofil, Viskosität, Verwirbelungen und Durchfluss im Gerät zu einer Kennlinie führen, die nur in einem bestimmten Messbereich

linear ist. Während bei dem Flügelradzähler das Fluid tangential an dem Turbinenrad (auch Flügelrad genannt) vorbeiströmt, liegt bei einem Woltmann-Zähler (die Turbinenradachse parallel zur Strömungsachse (axiale Anströmung)).

In der chemischen Industrie werden Woltmann-Zähler als Großwasserzähler mit Anschlussweiten ab 50 mm eingesetzt. Flügelradzähler werden fast ausschließlich als Hauswasserzähler benutzt. Bei den Flügelradzählern liegt die untere Messbereichsgrenze niedriger als bei den Woltmann-Zählern. In der Solartechnik wird der Flügelradzähler z.B. bei Überwachungsaufgaben ohne hohe Genauigkeitsansprüche eingesetzt.

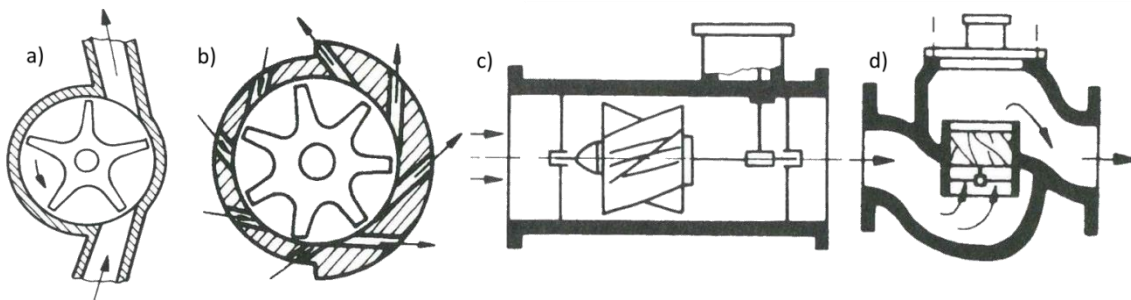


Abbildung 4: Flügelradzähler in Einstrahlbauweise (a), in Mehrstrahlbauweise (b), Woltmann-Zähler mit waagrecht (c) und senkrechtem (d) Einbau des Turbinenrades, (Bonfig, 2002, S.23 u. 29)

Wirbel-Durchflussmesser / Vortex-Durchflussmesser

Vortex-Durchflussmesser (VDX) wurden seit 1970 in der industriellen Durchflussmessung eingesetzt. VDX arbeiten nach dem Prinzip der Karman'schen Wirbelstraße. Hinter einem angeströmten Staukörper bilden sich abwechselnd beidseitig Wirbel mit entgegengesetztem Drehsinn (Abbildung 5). Dieses Phänomen wurde als Karman'sche Wirbelstraße genannt.

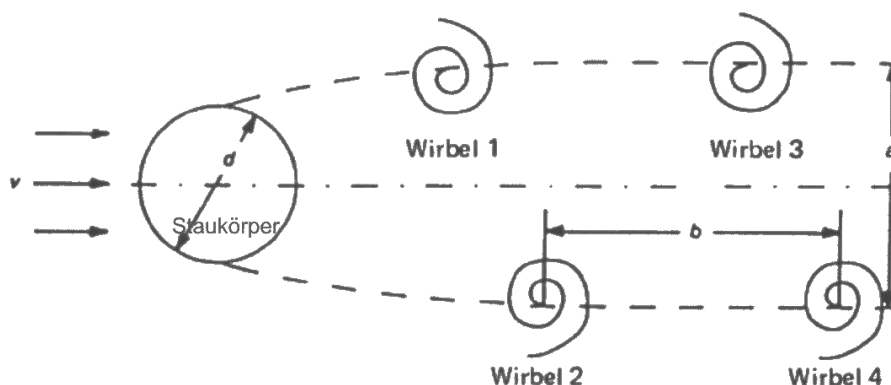


Abbildung 5: Wirbelbildung hinter einem in der Strömung befindlichen Staukörper (Bonfig, 2002, S. 228)

Die charakteristischen Größen von Wirbelstraßen wurden durch Strouhal entdeckt (Bonfig, 2002). Er hat den Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Wir-

Wirbelfrequenz nach dem zylindrischen Körper (Störkörper) festgestellt. Die Proportionalkonstante wurde nach Strouhal benannt und heißt Strouhal-Zahl:

$$f = Sr \times \frac{v}{d}$$

Hierbei ist f in Hz die Wirbelfrequenz, d in m der Durchmesser des Störkörpers, v in m/s die Strömungsgeschwindigkeit und Sr (einheitenlos) die Strouhal-Zahl.

Die Strouhal-Zahl ist abhängig von der Geometrie des Störkörpers (Form, Abmessung) und der Reynoldszahl der Strömung. Die Geometrie des Störkörpers ist in VDX-Sensoren so angepasst, dass die Strouhalzahl über einen großen Bereich von Reynoldszahlen konstant bleibt. Dadurch erreicht man eine lineare Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit von der Wirbelfrequenz. Die Untersuchungen haben verschiedene Ergebnisse für die optimale Geometrie des Störkörpers gezeigt. Es sind deltaförmige, zweiteilige und viereckige Staukörper bekannt.

Karman hat das konstante Verhältnis zwischen dem Wirbelabstand und der Wirbelfolge für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten festgestellt, siehe Abbildung 5 (Endress et al., 1990):

$$\frac{a}{b} = konst.$$

Außerdem beobachtete er, dass bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit die Wirbelfrequenz im Nachlauf fast konstant bleibt.

Moderne VDX-Sensoren erfassen die Wirbelfrequenz nach dem Störkörper auf unterschiedliche Weise. In Abbildung 6 sind die Querschnitte des Rohres mit dem eingebauten Messwertnehmer zu sehen. Einige davon sind im Folgenden erklärt.

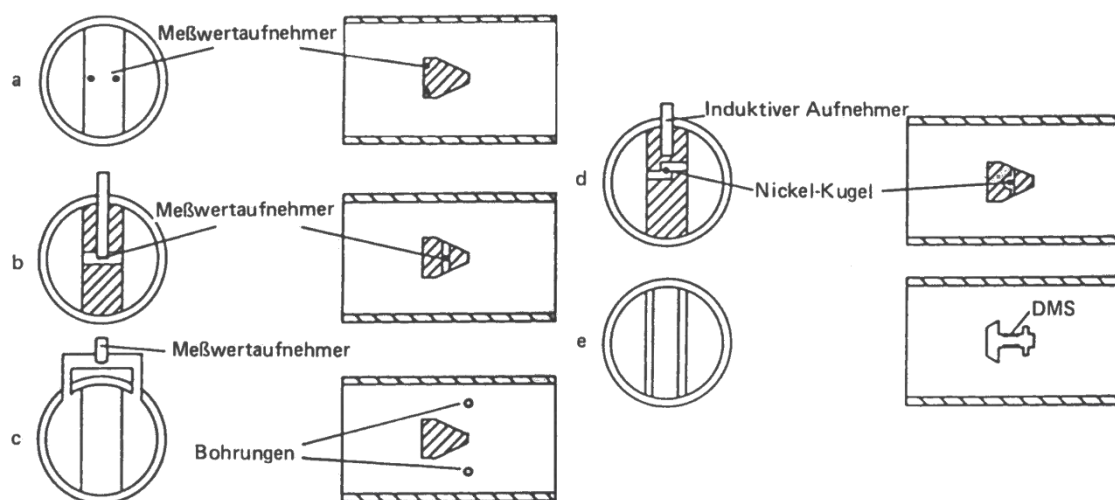


Abbildung 6: Messwertaufnehmer (Bonfig, 2002, S. 232)

a) Als Messwertaufnehmer kommen am Störkörper befestigte Thermistoren zum Einsatz. Abhängig von der Wirbelfrequenz erfolgt eine Abkühlung der elektrisch beheizten Thermistoren, wodurch eine Widerstandsänderung hervorgerufen wird.

b) Die Wirbelablösung verursacht Querkräfte am Störkörper. In einer im Störkörper eingebrachten Querbohrung entsteht dadurch eine periodische Änderung der Strömungsrichtung. Dies kann wieder mit Thermistoren aufgenommen werden.

e) DMS (Dehnmessstreifen) nutzen den Druckunterschied, der durch die Wirbel entsteht. DMS sind auf sogenannte Swingkörper (hinter dem trapezformigen Störkörper) eingebaut und ändern ihren Widerstand durch die erzeugten Kräfte während der Wirbelbildung.

Drall-Durchflussmesser

Der Eintrittsleitkörper versetzt den axial einströmenden Messstoff in eine Rotationsbewegung. Im Rotationszentrum bildet sich ein Wirbelkern, der über eine Rückströmung zu einer spiralförmigen Sekundärrotation gezwungen wird. Die Frequenz der Sekundärrotation ist proportional zum Durchsatz und verhält sich bei optimierter innerer Geometrie des Messgerätes über einen weiten Messbereich linear. Diese Frequenz wird mit einem Piezosensor erfasst (Abbildung 7). Das vom Messwertaufnehmer kommende durchflussproportionale Frequenzsignal wird im Messumformer weiterverarbeitet.

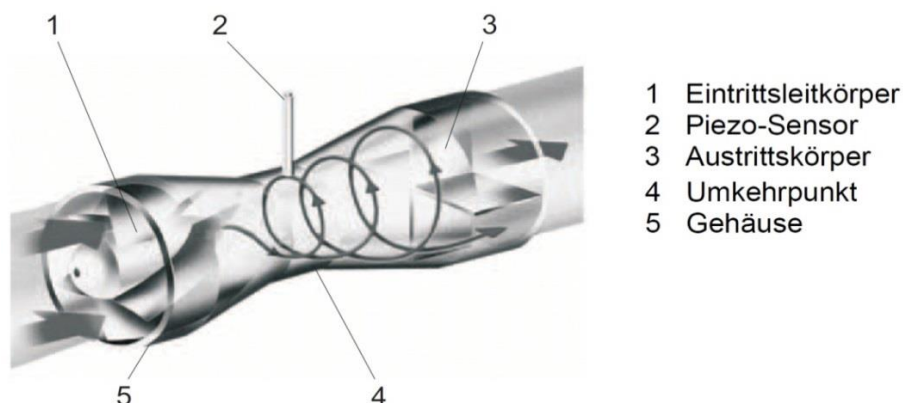


Abbildung 7: Prinzip eines Drall-Durchflussmessers (Datenblatt ABB SwirlMaster FSS430)

1.2 Durchflussmesser

Durchflussmesser ermitteln den Durchfluss durch die Messung physikalischer Größen, die eine Berechnung des Massen- bzw. Volumenstroms erlauben. So wird beispielsweise der Volumenstrom bestimmt, indem die Strömungsgeschwindigkeit in einem bekannten Querschnitt gemessen wird.

1.2.1 Volumendurchfluss

Wirkdruck-Messverfahren

Von den vielen Verfahren zur Durchflussmessung hat das Wirkdruckverfahren die weitaus größte Bedeutung. Grundlage für das Wirkdruckverfahren ist die Energiegleichung von Bernoulli in Verbindung mit dem Kontinuitätsgesetz. Vermindert man in einer Rohrleitung den Querschnitt, so erhöht sich an dieser Stelle die Geschwindigkeit des Messstoffes. Da nach der Energiegleichung von Bernoulli der Energiegehalt eines strömenden Stoffes, der sich aus der Summe von statischer und dynamischer Energie zusammensetzt, konstant bleibt, bewirkt die Zunahme der Geschwindigkeit eine Abnahme des statischen Druckes (Abbildung 8). Diese Differenz der statischen Drücke, der so genannte Wirkdruck, ist ein Maß für den Durchfluss Q . Die Fließgeschwindigkeit im Rohr bzw. der Volumenstrom kann nach (Bonfig, 2002, S. 36 ff) über folgende Gleichung berechnet werden:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\rho \times \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}}$$

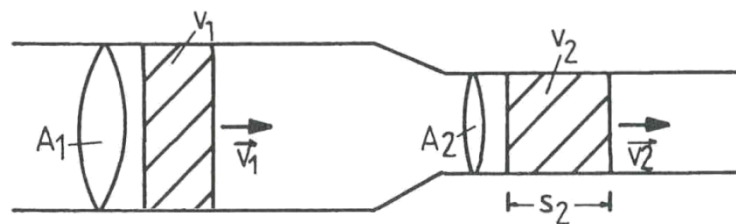
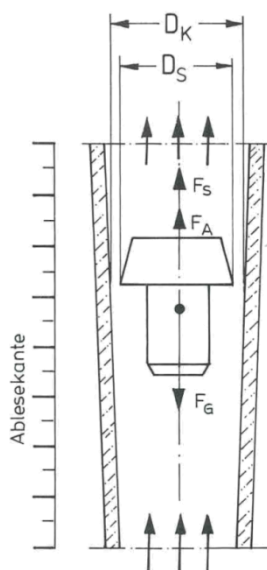


Abbildung 8: Prinzip des Wirkdruckverfahrens (Bonfig, 2002, S. 36)

Schwebekörper-Messverfahren



Mit einem Schwebekörper-Durchflussmesser lässt sich der Durchfluss von Gasen und Flüssigkeiten relativ einfach und genau bestimmen. Eine einfache Montage und ein günstiges Preis-Leistungsverhältnis sind weitere Vorteile von diesem Gerät. Nebenstehende Abbildung zeigt das generelle Funktionsprinzip des Verfahrens. Das Messgerät besteht aus einem Glaskonus, in dem sich ein Schwebekörper frei auf und ab bewegen kann. Das Durchflussmessgerät wird von unten nach oben durchströmt. Der Schwebekörper stellt sich so ein, dass die ihn angreifende Auftriebskraft F_A zuzüglich der Kraft des strömenden Mediums auf den Schwebekörper F_s mit seiner Gewichtskraft F_G im Gleichgewicht sind.

Abbildung 9: Schwebekörper Durchflussmesser (Hogrefe, 1994, S. 60)

$$F_G = F_A + F_S$$

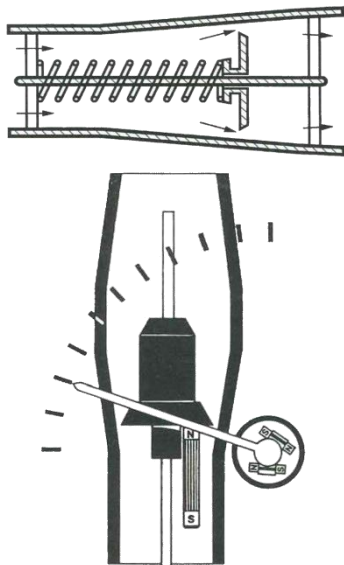
$$F_A = V_S \times \rho_W \times g$$

$$F_S = c_W \times A_S \times \frac{\rho_W \times v^2}{2}$$

$$F_G = V_S \times \rho_S \times g$$

V_S ist hierbei das Volumen des Schwebekörpers in m^3 , A_S ist der größte Querschnitt des Schwebekörpers senkrecht zur Strömungsrichtung in m^2 , ρ_S und ρ_W sind die Dichten des Schwebekörpers und Messstoffes in kg/m^3 , $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ist die Fallbeschleunigung und v ist die Geschwindigkeit des ungestörten Mediums in m/s .

Der Durchfluss kann anhand der Höhe des Schwebekörpers auf der Skala am Messglas abgelesen werden. Als Ablesekante dient üblicherweise die Stelle des größten Durchmessers des Schwebekörpers bzw. bei kugelförmigen Schwebekörpern der oberste Punkt. Die Ablesekante des im Praktikum verwendeten Schwebekörper-Durchflussmesser (Taco-Setter) ist die untere Kante.



Weitere Ausführungen von Schwebekörpermessgeräten zeigt die Abbildung 10. Die horizontale Variante (oben) arbeitet nach einem modifizierten Schwebekörper-Messprinzip. Der geführte Schwebekörper stellt sich so ein, dass die an ihm angreifende Durchflusskraft und die entgegenwirkende Federkraft im Gleichgewicht sind. Die durchflussabhängige Höhenstellung des Schwebekörpers kann je nach Messgerät durch eine magnetische Kopplung übertragen und auf einer Skala angezeigt (unten) oder von Magnetfeldsensoren erfasst und elektronisch verarbeitet werden. In der Solartechnik wird das Verfahren bei sehr geringen Genauigkeitsansprüchen, z.B. einfachen Funktionsprüfungen im Solarkreis, verwendet.

Abbildung 10: Weitere Ausführungen von Schwebekörpermessgeräten (Bonfig, 2002, S. 92) und (Hogrefe, 1994, S. 76)

Magnetisch- Induktive Durchflussmessung (MID)

Das Prinzip dieses Durchflussmessers beruht auf dem Faraday'schen Induktionsgesetz. An einem elektrischen Leiter, der durch ein Magnetfeld bewegt wird, entsteht eine Spannung, die proportional zur Stärke des Magnetfeldes und der Geschwindigkeit der Bewegung ist (Abbildung 11). In diesem Fall stellt die Flüssigkeit den Leiter dar. Ein Magnetfeld durchsetzt das Messrohr orthogonal zur Strömungsrichtung. Dann entsteht senkrecht zur Strömungsrichtung und zum Magnetfeld eine Spannung, die proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und damit zum Durchfluss ist.

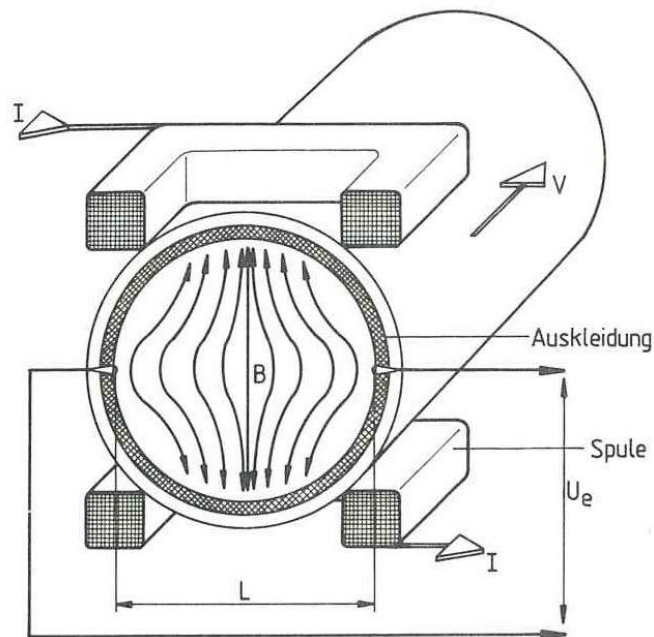


Abbildung 11: Funktionsprinzip der magnetisch-induktiven Durchflussmessung (Endress et. al., 1990, S. 27)

Für die Verwirklichung des beschriebenen Prinzips muss im inneren des Rohres ein Magnetfeld aufgebaut werden, die Flüssigkeit als Leiter muss eine Mindestleitfähigkeit haben und die induzierte Spannung muss störungsfrei abgegriffen werden können. Das Magnetfeld wird durch zwei Erregerspulen erzeugt, die mit Netzwechselspannung oder pulsierender Gleichspannung betrieben werden. Rohrstücke mit Erregerspulen müssen dabei aus nicht magnetisierbarem Rohrwerkstoff (z.B. austenitischer Stahl, rostfreies Stahlrohr 1.4301) bestehen, damit das Magnetfeld nicht abgeleitet wird. Der Abgriff der induzierten Spannung erfolgt an zwei isoliert angebrachten Elektroden. Die Isolierung zwischen Messstoff und Rohrstück wird durch eine Auskleidung erreicht. Sie entfällt, wenn das Rohrstück aus Kunststoff besteht. Typische Auskleidungen sind je nach Temperatur und Medium aus PTFE (Polytetrafluoroethylen), Weich- oder Hartgummi, PFE, PFA oder Elastomer. Die Elektrode ist meist mediumberührend, weswegen sie aus korrosionsfesten Materialien wie rostfreiem Stahl, Tantal, Titan, chargierten Kunststoffen oder Graphit bestehen. Die Mindestleitfähigkeit des Messstoffes ist in den Hersteller-Datenblättern der jeweiligen MIDs angegeben. Typische Anforderung je nach Gerätetyp sind mindestens 20, 5, oder 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ für demineralisiertes Wasser).

Ultraschall-Durchflussmessung

Bei der Ultraschall-Durchflussmessung wird die Geschwindigkeit des strömenden Messstoffes mit Hilfe von Schallwellen gemessen. Genauso wie bei oben beschriebenen MIDs sind keine Einbauten in den Querschnitt erforderlich, weswegen kein zusätzlicher Druckabfall entsteht. Ultraschall-Durchflussmesser basieren grundsätzlich auf zwei Prinzipien: Laufzeitmes-

sung und Dopplereffekt. Das in Abbildung 12 dargestellte Messsystem arbeitet nach dem Laufzeitdifferenz-Messverfahren. Bei diesem Messverfahren werden zwischen zwei Messaufnehmern akustische Signale (Ultraschall) gesendet. Die Signale werden bidirektional gesendet, d.h. der jeweilige Messaufnehmer arbeitet sowohl als Schallgeber als auch als Schallempfänger. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen gegen die Durchflussrichtung geringer ist als in Durchflussrichtung, entsteht eine Laufzeitdifferenz. Diese Laufzeitdifferenz ist direkt proportional zur Durchflussgeschwindigkeit.

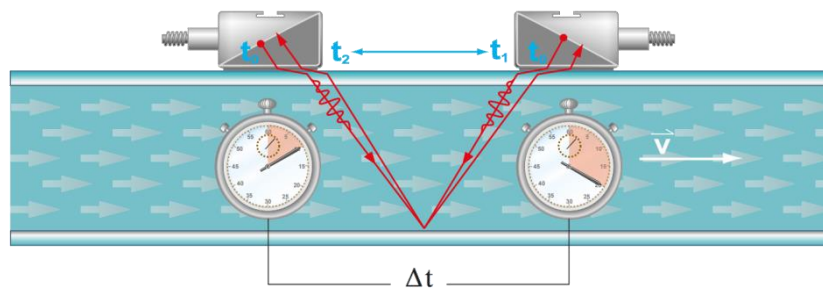


Abbildung 12: Funktionsprinzip eines Ultraschall-Durchflussmessers (Laufzeitverfahren)
(Datenblatt FLUXUS F/G601 und F/G608)

Während das Laufzeitverfahren für möglichst homogene Flüssigkeiten ohne Partikel eingesetzt wird, müssen solche Partikel für das Doppler-Verfahren vorhanden sein. Der Dopplereffekt ist die Änderung einer Schallfrequenz, die dann auftritt, wenn sich Schallquelle und Empfänger aufeinander zu und voneinander weg bewegen. Die Schallwelle mit der Senderfrequenz f_1 trifft auf einen in der Flüssigkeit schwimmenden Körper (Feststoffpartikel oder Gasblase) und wird reflektiert. Die zurückgeworfene Schallwelle trifft mit einer anderen Frequenz f_2 auf das Empfängerelement. Die Fließgeschwindigkeit errechnet man nach Gl. 2.6 (Hogrefe, 1994):

$$v = \frac{c}{2 \times \cos(\alpha)} \times \frac{f_1 - f_2}{f_1}$$

mit:

- f_1 in Hz : Senderfrequenz
- f_2 in Hz : Dopplerfrequenz
- c in m/s : Schallgeschwindigkeit
- v in m/s : Strömungsgeschwindigkeit
- α : Winkel zwischen den Vektoren der Strömungsrichtung
und der Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls

Das im Praktikum verwendete Ultraschallmessgerät von der FLEXIM GmbH basiert auf dem Laufzeitverfahren. Es hat ein clamp-on System, bei dem die Messköpfe bzw. Wandler von außen auf die Rohrleitung aufgesetzt werden. In Abbildung 12 ist das Prinzip eines clamp-on Ultraschall-Durchflussmessers zu sehen. Es ist wichtig, dass zwischen den Sensor-Kontaktflächen und der Rohraußenwand ein Koppelfett aufgetragen wird. Das Rohrmaterial, dessen Durchmesser und Wandstärke sowie die Anzahl der Schallwege müssen manuell am Ultraschallgerät eingegeben werden. Das Messgerät errechnet anhand dieser Parameter den optimalen Sensorabstand. Die erreichbare Messgenauigkeit liegt bei 2 bis 5 %. Sind nicht alle Parameter genau bekannt, so steigt der Messfehler entsprechend.

1.3 Auswahlkriterien

Bei der Auswahl eines geeigneten Messverfahrens spielen unterschiedliche Aspekte eine Rolle. Dies sind vor allem der Einfluss der Messstoffeigenschaften (Temperatur, Zähigkeit, Gas- oder Feststoffanteile), die strömungstechnischen Eigenschaften, das Einsatzspektrum und auf den Messort bezogene Grenzen sowie das Leistungsvermögen der Messgeräte (Messspanne, Messgenauigkeit, Montage und Wartung). Einen Überblick relevanter Eigenschaften zeigt nachfolgende Tabelle.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Messverfahren (DFM - Durchflussmesser)

	Nennweite DN	T_{max} in °C	Abw. in %	Einbaulage waagrecht senkrecht	bewegl. Teile
Volumenzähler					
Ovalradzähler	6..400	300	0,1..0,3	w	x
Ringkolbenzähler	15..800	300	0,2..0,3	w	x
Flügelradzähler	6..50	90	2	w	x
Woltmannzähler	50..500	200	2	w (s)	x
Turbinenzähler	5..600	250	0,5	w (s)	x
Wirbel-DFM	25..250	400	0,75	beliebig	
Drall-DFM	15..400	280	0,5	beliebig beliebig	
Durchflussmesser					
Wirkdruckmessverf.	< 50..2000	1000	2	beliebig	
Schwebekörper-DFM	3..100	360	1,5..2,5	beliebig	x
Magn. Induktiver DFM	1..3000	180	0,25	beliebig	
Ultraschall-DFM	10..3000	200	1	beliebig	
Coriolis-DFM	3..50	180	0,25	beliebig	
thermische Masse-DFM	25..200	300	2	beliebig	

2 Versuchsaufbau

Abbildung 13 zeigt ein Foto des Versuchsstandes. In diesem sind folgende Durchflussmessensoren seriell angeschlossen:

- Schwebekörperanzeiger (Taco-Setter)
- Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
- mobiles Ultraschall-Durchflussmessgerät
- Wirbel-Durchflussmesser / Vortex-Durchflussmessgerät
- Ringkolbenzähler
- Flügelradzähler 1 und 2
- stationäres Ultraschall-Durchflussmessgerät



Abbildung 13: Versuchsstand Durchflussmessung

In Tabelle 2 sind relevante Daten der Durchflussmessgeräte aufgeführt. Mit Ausnahme der Schwebekörper-Durchflussmessgeräte (Taco-Setter) werden die Messsignale aller anderen Messgeräte mit Hilfe der Messdatenerfassung aufgezeichnet werden. Das Messintervall beträgt 1 Sekunde.

Zusätzlich sind in dem Versuchsaufbau zwei Thermoelemente Typ T (T_1 und T_2) für die Volumenstrommessung nach der Laufzeitmethode integriert. Zudem können die Temperatur-Messwerte für die Ermittlung der Stoffwerte von Wasser genutzt werden. Für die Messdaten-

aufnahme und deren Visualisierung wird ein Messdatenerfassungssystem der Fa. Agilent und ein Laptop verwendet.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Messgerätedaten lt. Hersteller

Messgerät	Hersteller / Bezeichnung	Nenn- Durchfluss in l/h	min. Durchfluss in l/h	max. Durchfluss in l/h	Unsicherheit in %
Schwebekörper	Tacosetter / taconova	-	36, 120, 240	144, 480, 900	$\pm 10\%$ v.M. ¹⁾
MID	Endress & Hauser / Promag 30A	-	-	3000	$0,5\%$ v.M. ¹⁾
Ultraschall-DFM, mobil	FLEXIM / Fluxus F601	abhängig vom Schall- wandler			0,5..1,6
Vortex DFM	Huba Control / Typ 236	-	54	900	$< 50\%$ FS: $< 1\%$ v.E. ^{1), 2)} $> 50\%$ FS: $< 2\%$ v.M.
Ringkolbenzähler (1,0 Liter/Impuls)	Zenner / RTKD	2500	50 (Anlauf: < 2)	5000	-
Flügelradzähler 1 ³⁾ (0,5 Liter/Impuls)	Technische Alternative / ETW-S	2500	(Anlauf: 12)	3000	$< 2\%$ v.M. ¹⁾
Flügelradzähler 2 ³⁾ (0,25 Liter/Impuls)	Lorenz / ETW	2500	-	5000	$< 2\%$ v.M. ¹⁾
Ultraschall-DFM, stationär	Landis+Gyr / T550	600	6	1200	Klasse 2 ⁴⁾ $E_f = (2+0,02q_p/q)$

¹⁾ v.M.: vom Messwert

²⁾ v.E.: vom Endwert (auch FS: full scale)

³⁾ Die beiden Flügelradzähler geben als Ausgangssignal Impulse aus. In dem Praktikums-Versuchsstand werden die Impulse jedoch mit einem Impuls/Analog-Wandler in ein 0-5 V DC Signal umgewandelt.

⁴⁾ Genauigkeitsklasse nach der „Measurement Instruments Directive“ (MID)

Ef: Abweichung des angezeigten Werts zum wahren Wert in % (jedoch max. 5 %),

q: angezeigter Durchfluss, q_p : höchster zulässiger Durchfluss

Die Rohrleitungen werden mit Wasser durchströmt. Hierfür ist der Kreislauf an die Hauswasserleitung angeschlossen. Über den Wasserhahn tritt das Wasser in den Kreislauf ein, durchströmt die Durchflusssensoren und tritt danach wieder aus dem Kreislauf aus. Die folgende Abbildung zeigt das Hydraulikschema.

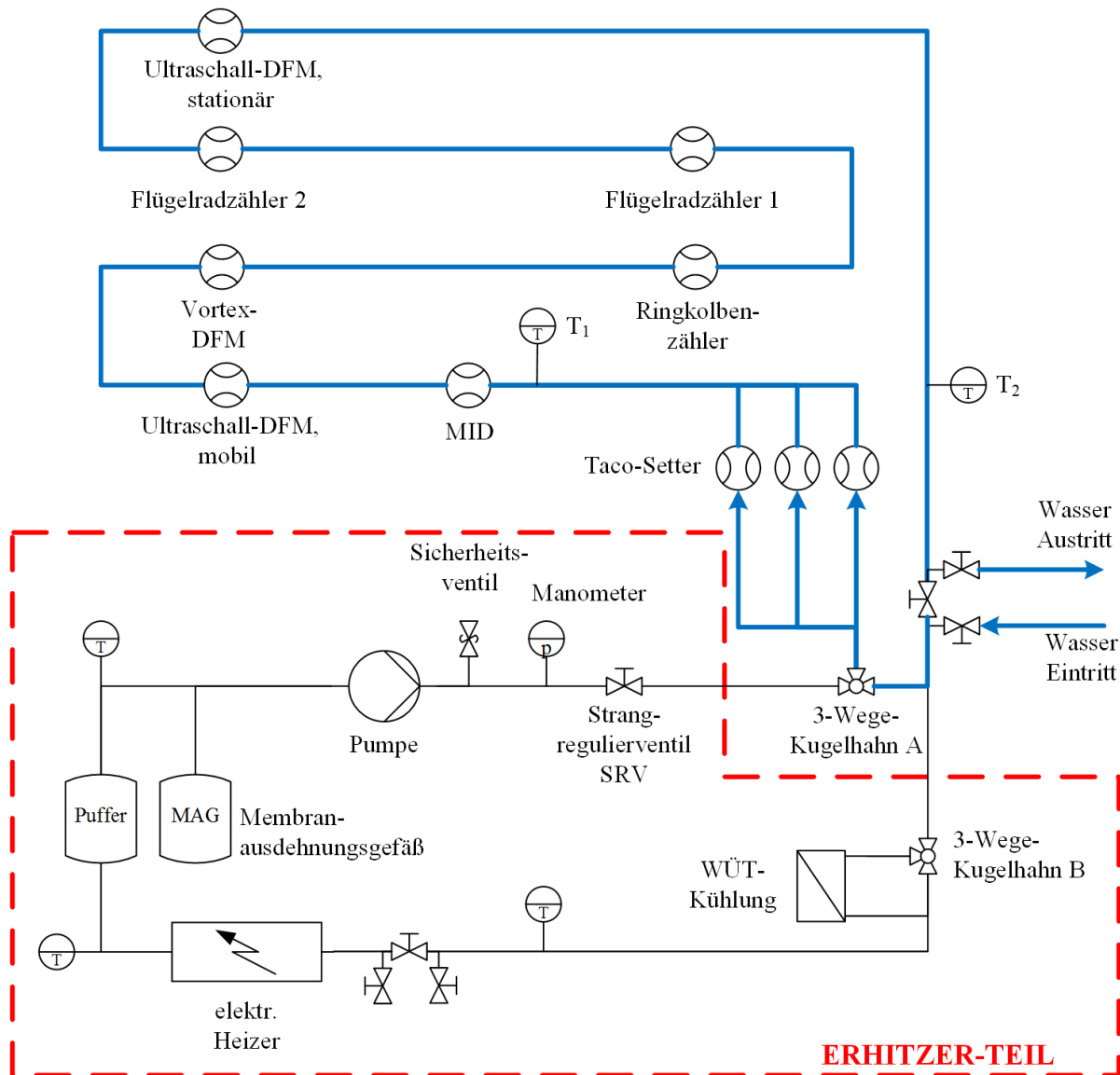


Abbildung 14: Hydraulikschema Durchflussmessung

Der Versuchsstand bietet die Möglichkeit, dass Wasser mit Hilfe eines elektrischen Durchlauferhitzers zu temperieren. Zudem kann der Versuchsstand auch mit geschlossenem Kreislauf mit einer Pumpe betrieben werden (s. Abbildung 14, „ERHITZER-TEIL“). Diese beiden Funktionen werden im Praktikum jedoch **nicht** benötigt. Im Hydraulikschema ist der für das Praktikum relevante Teil in blau dargestellt.

3 Versuchsbeschreibung

Es sollen verschiedene Volumenströme mit unterschiedlichen Durchflusssensoren gemessen werden. Die Sensoren sind im Versuchsaufbau in Serie geschaltet. Über eine Schlauchleitung ist der Versuchsaufbau an das Hauswassernetz angeschlossen, über das kaltes oder warmes Wasser (bis ca. 50 °C) in den Versuchsaufbau eingeleitet wird. Nach dem Durchströmen der

Durchfluss-Sensoren tritt das Wasser über eine zweite Schlauchleitung aus und wird in den Ausguss geleitet bzw. wird zur Messung mittels Wägevorgahren in einem Behälter (Eimer) aufgefangen.

Das Wägevorgahren dient als **Referenz**. Dabei wird der Massenstrom \dot{m} in einem inkrementellen Zeitraum $t_{D,i}$ (mit einer Stoppuhr gemessen) in einem Behälter aufgefangen. Anschließend wird die aufgefangene Masse m_i im Behälter mit einer vorher tarierten Waage ermittelt. Durch die Division der gewogenen Masse durch die Zeit erhält man den mittleren Massenstrom \dot{m} für den Zeitraum $t_{D,i}$. Für den stationären Fall, d.h. beim konstanten Massenstrom im Messintervall, stellt der mittlere Massenstrom \dot{m} auch den Augenblickswert des Massenstroms \dot{m} für den gesamten Zeitraum der Messung dar.

$$\dot{m}_i = \frac{m_i}{t_{D,i}}$$

Wenn das Messintervall $t_{D,i}$ und die Masse m_i ausreichend groß gewählt werden, ist dieses Verfahren die **genaueste Variante** zur Ermittlung des mittleren Massenstroms.

Druckschwankungen des Hauswassersystems wirken sich auf den Volumenstrom aus. Aus diesem Grund müssen die Aufzeichnung der Messdaten (mit dem Messdatenerfassungsgerät) und das Wägevorgahren (mit Waage und Stoppuhr) bei den einzelnen Messungen immer zeitgleich erfolgen. Hierfür müssen sich die beiden Versuchsdurchführenden abstimmen.

Die in der Aufgabenstellung vorgegebenen Soll-Durchflüsse werden an den Schwebekörper-Durchflussmessgeräten (Taco-Setter) eingestellt. Hierfür verfügen diese über eingebaute Kugelventile, die mit einem Schraubendreher eingestellt werden können. Durch das Schließen der Kugelventile verringert sich der Durchfluss und umgekehrt. Je nach gewähltem Volumenstrom kann einer der drei Taco-Setter mit entsprechendem Messbereich genutzt werden. Die beiden unbenutzten werden abgesperrt.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Versuch 1: Durchfluss-Messung

- Stellen sie den 3-Wege-Kugelhahn A so, dass der rote Griff senkrecht steht (Erhitzer-Teil des Versuchsstands ist abgekoppelt).
- Stellen Sie sicher, dass sich der Wasseraustritts-Schlauch im Ausguss des Waschbeckens befindet.
- Öffnen Sie am Versuchsstand die Kugelhähne für Wassereintritt und -austritt.

-
- Öffnen Sie den Wasserzulauf am Waschbecken. Bewegen Sie hierfür den langen Hebel am Thermostatventil **vollständig** von links nach rechts. Das Wasser durchströmt nun den Versuchsaufbau und fließt nach dem Austritt in den Abguss.
 - Führen Sie nun die Messungen V1 bis V6 für folgende Soll-Volumenströme durch:
 - V1: 60 l/h linken Taco-Setter benutzen
 - V2: 120 l/h linken Taco-Setter benutzen
 - V3: 240 l/h mittleren Taco-Setter benutzen
 - V4: 360 l/h mittleren Taco-Setter benutzen
 - V5: 480 l/h rechten Taco-Setter benutzen
 - V6: 660 l/h rechten Taco-Setter benutzen
 - Regeln Sie für Ihre Messungen den jeweiligen Soll-Volumenstrom mit Hilfe des Kugelventils am Taco-Setter ein. Benutzen Sie hierfür einen Schraubendreher. Hinweis: Die Taco-Setter zeigen den Durchfluss in Liter/Minute an.
 - Stellen Sie den leeren Eimer auf die Waage und tarieren Sie die Waage.
 - Starten Sie nun die Messdatenaufzeichnung am Laptop **zeitgleich** mit der Stoppuhr und der Befüllung des Eimers (Wasser aus Schlauch in den Eimer laufen lassen). Sprechen Sie sich hierfür ab.
 - Wenn die von Ihnen gewünschte Wassermasse im Eimer ist, stoppen Sie die Befüllung des Eimers (Schlauch zurück in den Abguss) sowie die Stoppuhr **gleichzeitig** mit der Messdatenerfassung. Sprechen Sie sich auch hier untereinander ab.
 - Speichern Sie die Daten für jede Messung auf dem Laptop in einer separaten Datei.
 - Wiederholen Sie diesen Vorgang für alle oben angegebenen Soll-Volumenströme.

4.2 Versuch 2: Laufzeit-Verfahren

- Stellen Sie erneut einen Volumenstrom von ca. 240 l/h ein (immer noch kaltes Wasser).
- Warten Sie eine Minute und drehen dann (schnell) das Thermostatventil am Hauswasseranschluss auf Maximum „warm“ über die Sicherheitssperre (Knopf am Drehgriff) hinweg nach links. Sie führen durch diese Veränderung der Wassertemperatur einen Temperatursprung herbei.
- Lassen Sie sich auf dem Monitor die beiden Temperaturen T_1 und T_2 in einem Diagramm darstellen. Sie können nun die durchlaufende Temperaturflanke im Wasser des Versuchskreises erkennen.

-
- Warten Sie den Zeitpunkt ab an dem auch T_2 ein scheinbares Maximum etwa bei 45 °C bis 50 °C erreicht hat. Nun drehen Sie das Thermostatventil (schnell) wieder auf die Position „kalt“ (nach rechts).
 - Warten Sie wieder bis die angezeigten Temperaturwerte scheinbar in Beharrung gehen.
 - Stoppen Sie die Messung und speichern Sie ihre Messdaten ab.
 - Schließen Sie den Hauswasseranschluss und das Ein- und Ausgangsventil des Versuchstandes.
 - Messen Sie den Abstand zwischen den Sensoren T_1 und T_2 mit Hilfe eines Seils und eines Gliedermaßstabs.

5 Versuchsauswertung

5.1 Versuch 1

- Führen Sie mit den Messdaten aus den Messungen V1 bis V6 eine statistische Fehlerrechnung durch. Berechnen Sie jeweils für alle Messgeräte das arithmetische Mittel \bar{x} sowie die Standardabweichung σ . Geben Sie diese Werte inklusive der Anzahl der jeweils zu Grunde liegenden Messungen in einer Tabelle an.
- Berechnen Sie die Durchflüsse aus dem Wägeverfahren. Schätzen Sie für das Wägeverfahren den systematischen Fehler u_{sys} ab. Rechnen Sie die Ergebnisse in die Einheit l/h um.
- Stellen Sie in einem Linien-Diagramm die prozentuale Abweichung jedes Messgeräts vom „wahren Durchfluss“ aus dem Wägeverfahren dar.
- Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

5.2 Versuch 2

- Stellen Sie den Temperaturverlauf der beiden Temperatursensoren T_1 und T_2 in einem Liniendiagramm dar.
- Ermitteln Sie die Laufzeit bis der Temperatursprung sich von einem zum anderen Sensor bewegt hat. Prüfen Sie, ob sich die ansteigende oder die abfallende Temperaturflanke besser hierfür eignet.
- Berechnen Sie mit Hilfe der Laufzeit und dem Ergebnis Ihrer Längenmessung den Durchfluss in der Einheit l/h. Annahme: Die Rohrrinnendurchmesser aller Hydraulikteile (Kup-

ferrohr, Messgeräte) zwischen den Temperatursensoren T_1 und T_2 betragen jeweils 20 mm.

- Schätzen Sie die Messunsicherheit u dieser Methode ab und diskutieren Sie ob die Zeitmessung oder die Längenmessung einen größeren Einfluss auf die Messunsicherheit hat.
- Vergleichen Sie den ermittelten Volumenstrom mit dem MID blau und diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

Literaturverzeichnis

(Bonfig, 2002) Bonfig, K.W. 2002. Technische Durchflussmessung unter besonderer Berücksichtigung neuartiger Durchflussmessverfahren. Vulkan-Verlag Essen.

(Endress et. al., 1990) Endress, Hafner, Jäggi, Kempf, Lang, Meyer, Schinke, Schulz, Sickinger, Silbermann, Steiner, Thommen, Tschabold, Wetzler, & Zeller. 1990. Durchflussfibel. FLOWTEC AG.

(Hogrefe, 1994) Hogrefe, W. 1994. Handbuch der Durchflussmessung. Fischer u. Porter GmbH Goettingen.

(Hoffmann, 2013) Karger, R., & Hoffmann, F. 2013. Wasserversorgung: Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung, Verteilung. Springer Vieweg. 14. Auflage.

(Böckh Saumweber, 2013) von Böckh, P., & Saumweber, C. 2013. Fluidmechanik: Einführendes Lehrbuch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 3. Auflage.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Durchfluss- und Mengenmessgeräte (Hogrefe, 1994, S. 24)	3
Abbildung 2: Funktionsprinzip eines Ovalradzählers (Böckh & Saumweber, 2013)	4
Abbildung 3: Funktionsprinzip des Ringkolbenzählers (Hoffmann, 2013)	5
Abbildung 4: Flügelradzähler in Einstrahlbauweise (a), in Mehrstrahlbauweise (b), Woltmann-Zähler mit waagerechtem (c) und senkrechtem (d) Einbau des Turbinenrades, (Bonfig, 2002, S.23 u. 29)	6
Abbildung 5: Wirbelbildung hinter einem in der Strömung befindlichen Staukörper (Bonfig, 2002, S. 228)	6
Abbildung 6: Messwertaufnehmer (Bonfig, 2002, S. 232)	7
Abbildung 7: Prinzip eines Drall-Durchflussmessers (Datenblatt ABB SwirlMaster FSS430)	8
Abbildung 8: Prinzip des Wirkdruckverfahrens (Bonfig, 2002, S. 36)	9
Abbildung 9: Schwebekörper Durchflussmesser (Hogrefe, 1994, S. 60)	9
Abbildung 10: Weitere Ausführungen von Schwebekörpermessgeräten (Bonfig, 2002, S. 92) und (Hogrefe, 1994, S. 76)	10

Abbildung 11: Funktionsprinzip der magnetisch-induktiven Durchflussmessung aus (Endress et. al., 1990, S. 27).....	11
Abbildung 12: Funktionsprinzip eines Ultraschall-Durchflussmessers (Laufzeitverfahren) (Datenblatt FLUXUS F/G601 und F/G608).....	12
Abbildung 13: Versuchsstand Durchflussmessung.....	14
Abbildung 14: Hydraulikschema Durchflussmessung.....	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Messverfahren (DFM - Durchflussmesser).....	13
Tabelle 2: Zusammenfassung der Messgerätedaten lt. Hersteller.....	15