



Fachgebiet  
Umweltgerechte Produkte und Prozesse

Prof. Dr.- Ing. J. Hesselbach

## Praktikum Messen von Stoff- und Energieströmen

Eingereicht am:

Angefertigt von:

Name, Vorname	Matrikelnummer

## Zu den Versuchen

Die durchzuführenden Versuche dienen zur Vertiefung von theoretisch erworbenem Wissen. Es wird vorausgesetzt, dass das Thema Messen von Stoff- und Energieströmen im Rahmen einer Schulungsmaßnahme bereits behandelt wurde. Durch die Versuchsaufbauten lernt der Lernende die Grundlagen zur Messung von Stoff- und Energieströmen. Bei der Entwicklung der Versuche wurde besonderer Wert darauf gelegt praxisübliche Komponenten und Betriebsmittel einzusetzen.

Zur Versuchsvorbereitung gehört, dass die Versuchsdurchführung genau durchzulesen ist. Unvorbereitete Teilnehmer werden von dem Praktikum ausgeschlossen. Die Vorgehensweise wurde bewusst in knappen Worten gefasst, um den Versuchsaufbau und die Durchführung so transparent wie möglich zu gestalten. Die beschriebene Reihenfolge der Einzelschritte sollten eingehalten werden, um Fehlmessungen und damit Fehlinterpretationen zu vermeiden.

## Inhaltsverzeichnis

1	Temperaturmessung mit thermischem Kontakt .....	1
1.1	Kalibrierung .....	3
1.1.1	Durchführung .....	4
1.1.2	Auswertung .....	4
1.2	Ansprechzeit .....	4
1.2.1	Durchführung .....	5
1.2.2	Auswertung .....	5
1.3	Wärmekapazität .....	5
1.3.1	Durchführung .....	6
1.3.2	Auswertung .....	6
2	Thermografie .....	7
2.1	Durchführung .....	7
2.2	Auswertung .....	8
3	Durchflussmessung .....	9
3.1	Vergleich der Messsysteme .....	10
3.1.1	Durchführung .....	10
3.2	Störung durch Luftstrom .....	11
3.2.1	Durchführung .....	11
3.3	Auswertung .....	12
4	Volumenstrommessung .....	12
4.1	Durchführung .....	12
4.2	Auswertung .....	13
5	Leistungsmessung .....	14

5.1 Durchführung .....	14
5.2 Auswertung .....	14
6 Theorie .....	15
6.1 Temperaturmessung .....	15
6.1.1 Allgemein.....	15
6.1.2 Temperaturerfassung .....	15
6.1.3 Thermoelemente .....	16
6.1.4 Widerstandthermometer.....	18
6.1.5 Messunsicherheit.....	20
6.1.6 Kalibrieren von Thermometern.....	22
6.2 Thermografie .....	23
6.2.1 Strahlungsphysikalische Grundlagen .....	23
6.2.2 Fehlerquellen.....	24
6.3 Durchflussmessung .....	24
6.3.1 Ultraschall Durchflussmesser .....	24
6.3.2 Coriolis Durchflussmesser .....	25
6.3.3 Wirbelstrom Durchflussmesser.....	25
6.3.4 Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser.....	26
6.3.5 Schwebekörper Durchflussmesser.....	26
6.4 Volumenstrommessung .....	27
6.4.1 Staudruckverfahren .....	27
6.4.2 Flügelradanemometer.....	27
6.5 Leistungsmessung .....	29
6.5.1 Hallsensor .....	29
Abbildungsverzeichnis .....	I

Tabellenverzeichnis.....I

## **1 Temperaturmessung mit thermischem Kontakt**

Im Rahmen des Praktikums des Moduls „Messen von Stoff- und Energieströmen“ sollen in den hier beschriebenen Versuchen die Grundlagen der Temperaturmessung mit thermischem Kontakt vermittelt werden. Hierbei sollen Temperaturen in Flüssigkeiten und Luftströmen ermittelt werden, um somit die Eigenschaften der Messmittel kennenzulernen. Verglichen werden Thermoelemente und Widerstandsthermometer in den Eigenschaften Genauigkeit, Ansprechzeit und Wärmekapazität.

Bei den Versuchen werden drei Thermoelemente (grün) mit den Durchmessern 6mm, 3mm und 1mm und zwei Widerstandsthermometer (orange) mit den Durchmessern 6mm und 3mm verwendet. Die Temperaturen werden in einem Wassertopf, in einem von einem Fön verursachten Luftstrom und in mit Wasser befüllten Reagenzgläsern gemessen.



Die Daten werden über ADAM 6015 und 6018 Messwandler Modul und ADAM.NET Utility Software in einem Intervall von einer Sekunde aufgezeichnet. Dabei werden die Kenngrößen Temperatur und Zeit graphisch auf einem Monitor visualisiert und parallel in einer Excel-Datei gesichert.

Die folgende Abbildung zeigt den skizzenhaften Versuchsaufbau.

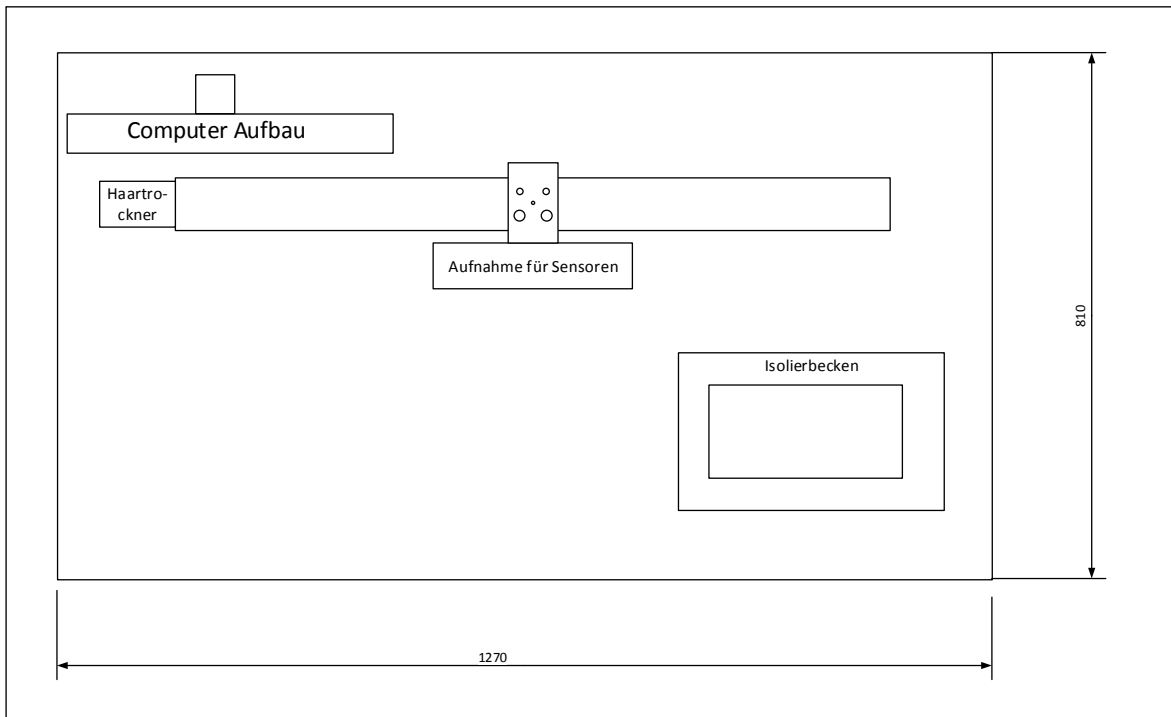


Abbildung 1: Versuchsstand

### 1.1 Kalibrierung

Im Versuch Kalibrierung soll die bekannte systematische Messabweichung identifiziert und in einer Kalibriergeraden dargestellt werden. Die Messgeräte liefern Ergebnisse, welche von den tatsächlichen Messgrößen abweichen, wobei die Abweichung, je nach Hersteller oder Art des Messgeräts, stark oder schwach ausfallen kann. Ziel ist es mit den gewonnenen Daten eine Kalibrierung der Messgeräte vorzunehmen und somit die um die systematischen Messabweichungen bereinigte Temperatur darzustellen.



### 1.1.1 Durchführung

Um die Kalibriergerade und die Abweichungen der einzelnen Messgeräte zu bestimmen, werden mindestens zwei Bezugstemperaturen benötigt. Deutlich besser geeignet sind drei oder mehr Bezugstemperaturen.

Ein Kalibriergerät sorgt für die gewünschte exakte Bezugstemperatur. Die Daten Erfassung und Darstellung der Werte erfolgt über die Software.

Als sinnvolle Bezugstemperaturen haben sich 25°C, 40°C und 55°C erwiesen. Dies muss aber nicht so sein.

### 1.1.2 Auswertung

Für die Auswertung soll nun die Differenz zum jeweiligen Bezugswert (die drei Bezugstemperaturen) jeweils für die einzelnen Messinstrumente gebildet und anschließend die Kalibriergerade erstellt werden. Die Messungen und Be-

	PT100_3mm	PT100_6mm	TE_1mm	TE_3mm	TE_6mm
Wasser (T=25°C)					
Wasser (T=40°C)					
Wasser (T=55°C)					

obachtungen sollen interpretiert und diskutiert werden.

**Tabelle 1: Bezugswerte zur Kalibrierung**

## 1.2 Ansprechzeit

Jedes Messsystem besitzt eine bestimmte Trägheit, sodass das Ausgangssignal dem Eingangssignal nicht in einer beliebig kurzen Zeit folgen kann. Das dynamische Verhalten eines Messsystems beschreibt die Abhängigkeit der Ausgangsgröße von der Eingangsgröße bis zum Erreichen des stationären Zustandes. In diesem Versuch soll das dynamische Verhalten der Messgeräte über die Ansprechzeit untersucht werden. Dabei ist die Ansprechzeit die Summe der Totzeit und der Einstellzeit. Ziel ist es herauszufinden wie viel Zeit benötigt wird, bis sich die

jeweiligen Sensoren der Messinstrumente im thermischen Gleichgewicht befinden.

### 1.2.1 Durchführung

Zunächst sollen die Sensoren senkrecht durch die Rohrwand geführt werden. Mit Hilfe des Föns werden zu Beginn des Versuches alle Messfühler **kalt** angeströmt. Dies stellt sicher, dass alle Messfühler auf demselben Temperaturniveau sind. Anschließend wird das Rohr mit **heißer** Luft durchströmt. Mit dem Einschalten des Föns, um die Messsensoren zu erwärmen, sollte gleichzeitig die Stoppuhr starten. Die gemessenen Temperaturverläufe der einzelnen Leiter werden durch die Software aufgezeichnet. Bei der ersten Änderung der Temperaturkurve wird die Zeit gestoppt. Die gestoppte Zeit entspricht der Totzeit. Diese Messung sollte mindestens fünfmal wiederholt werden, um ein repräsentatives Ergebnis zu erlangen. Gleiches gilt hierbei für die Messung der Einstellzeit.

### 1.2.2 Auswertung

Bei der Auswertung sind die jeweiligen Start- und Endtemperaturen sowie die Ansprechzeit der einzelnen Sensoren zu ermitteln. Die Messung und Beobachtung soll interpretiert und diskutiert werden.

	Starttemperatur [°C]	Endtemperatur [°C]	Ansprechzeit [Sek.]
PT100_3mm			
PT100_6mm			
TE_1mm			
TE_3mm			
TE_6mm			

Tabelle 2: Ansprechzeiten

## 1.3 Wärmekapazität

Eine häufige Fehlerquelle bei Temperaturmessungen ist die spezifische Wärmekapazität der unterschiedlichen Messinstrumente. Im Versuch Wärmekapazität soll daher der Einfluss der Wärmekapazität der unterschiedlichen metallischen Sensoren auf die Messumgebung ermittelt werden.

### 1.3.1 Durchführung

Zunächst werden die Sensoren mittels heißen Wassers auf eine Temperatur von ca. 55°C gebracht. Währenddessen werden fünf Reagenzgläser mit 10 ml kaltem Wasser (25°C) gefüllt. Die erhitzten Sensoren werden gleichzeitig in die Reagenzgläser eingetaucht. Anschließend sollten sich die Messfühler einpendeln und die Temperatur einen stationären Wert erreichen. Die sich einstellende Endtemperatur in den Reagenzgläsern ist zu notieren.

### 1.3.2 Auswertung

Mittels der aus Versuch 1.1 ermittelten Temperaturabweichungen lassen sich nun die realen Temperaturwerte jedes einzelnen Reagenzglases ermitteln. Auch hier

	PT100_3mm	PT100_6mm	TE_1mm	TE_3mm	TE_6mm
Endtemperatur [°C]					

sollen die Messung und Beobachtung interpretiert und diskutiert werden.

**Tabelle 3: Endtemperaturen Reagenzgläser**

## 2 Thermografie

Mithilfe der Thermografiekamera kann die Wärmestrahlung von Körpern ermittelt werden, da jeder Körper oberhalb von 0 K Wärmestrahlung emittiert. Thermografiekameras haben einen geeigneten Empfänger zur Messung dieser Wärmestrahlung, welche variieren kann. Dabei sind dies entweder thermische Detektoren, welche die Strahlung absorbieren oder Quantendetektoren, die auf Basis des Fotoeffekts arbeiten.

Ziel des Versuches ist es verschiedene Materialien mit der Thermografiekamera zu erfassen und dabei auftretende Unterschiede und Störeinflüsse zu erkennen. Da die Kenntnis des Emissionsgrades bei der Thermografie von zentraler Bedeutung ist, werden mit dem Versuch verschiedene Verfahren angewandt, mit denen man den Emissionskoeffizient bestimmen kann. Zu den Verfahren zählen die Referenztemperatur und die Methode des schwarzen Strahlers.

Die im Versuch zu verwendeten Materialien und Oberflächen sind:

Wärmebildkamera, Thermoelement, Heizstrahler, Herdplatte mit unterschiedlicher Beschichtung, Metallplatte (glatt), Metallplatte (rau), schwarze Kunststoffplatte, Plexiglas, Folie

### 2.1 Durchführung

Die Wärmebildkamera soll aufgebaut und auf den Versuchsstand gerichtet werden. Da alle Materialien sich bereits vorher im Raum befinden, kann davon ausgegangen werden, dass diese die Temperatur des Raumes angenommen haben. Es ist also zunächst die Raumtemperatur zu ermitteln. Zusätzlich zu der Raumtemperatur wird ein Thermoelement verwendet, um die Oberflächentemperatur der verschiedenen Materialien zu bestimmen. Jedes Bild der sich ergebenden Thermografie soll zur späteren Auswertung gespeichert werden.

Als Erstes wird die Herdplatte auf dem Versuchstand aufgebaut und für mindestens 10 Sekunden erhitzt. Danach wird mit Hilfe des Thermoelements die Temperatur der unterschiedlichen Lacke ermittelt. Anschließend wird die angezeigte Temperatur der Wärmebildkamera mit der gemessenen Temperatur des Thermoelements angeglichen. Nun kann der Emissionsgrad für den jeweiligen Lack ermittelt werden.

Als Nächstes werden die Metalplatten und das Plexiglas betrachtet. Hierbei wird der Abgleich mit dem Thermoelement **nicht** vorgenommen.

Im dritten Schritt soll die schwarze Kunststoffplatte aufgebaut werden. Diese Kunststoffplatte kann als idealer schwarzer Strahler angenommen werden.

Im letzten Schritt wird die Folie aufgespannt. Hinter der Folie soll der Heizstrahler platziert und eingeschaltet werden.

## **2.2 Auswertung**

Die gespeicherten Bilder der einzelnen Materialien sollen ausgewertet werden. Anhand dieser Bilder sollen Störeinflüsse, Messfehler und Möglichkeiten diese zu vermeiden erklärt werden. Die Messungen und Beobachtungen sind zu interpretieren und zu diskutieren.

### 3 Durchflussmessung

In der Industrie und besonders in Kraftwerken ist eine Messung von Volumen- und Massenströmen sehr wichtig zur Bestimmung von Prozessen, zur Dimensionierung der Kühlanlage und zur Aufdeckung von Leckagen. Im Rahmen des Praktikums des Moduls „Messen von Stoff- und Energieströmen“ sollen in den hier beschriebenen Versuchen die Grundlagen der Durchflussmessung vermittelt werden. Für eine Durchflussmessung können verschiedene Messgeräte mit verschiedenen Messprinzipien genutzt werden. Im folgenden Versuch werden einige Messgeräte exemplarisch dargestellt und es wird der Durchfluss in einem gegebenen Versuchsstand gemessen. Das Ziel ist es, die Vor- und Nachteile verschiedener Messgeräte zu bestimmen und durch eine simulierte Störung die Reaktion der Messgeräte zu testen. Neben den bereits installierten Messgeräten wird ein portables Ultraschalldurchfluss-Messgerät (USD) installiert und die gegebenen Bedingungen eingestellt.

Das folgende Bild zeigt den Versuchsaufbau der Durchflussmessung.

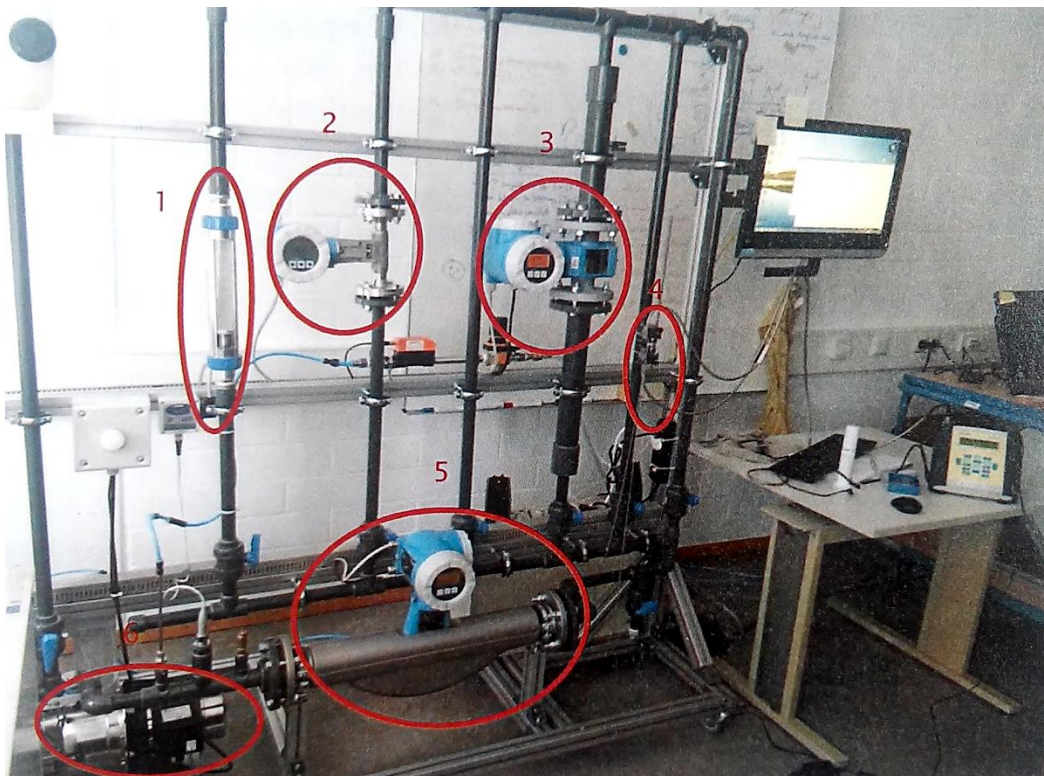


Abbildung 2: Versuchsaufbau Durchflussmessung

1. Schwebekörper-Durchflussmesser
2. Wirbelzähler-Durchflussmesser
3. Magnetisch-induktiver-Durchflussmesser
4. Ultraschall-Durchflussmesser
5. Coriolis-Massendurchflussmesser
6. Pumpe

### 3.1 Vergleich der Messsysteme

Bei diesem Versuch werden die einzelnen Messsysteme miteinander verglichen und bewertet. Dabei sind Vor- und Nachteile festzuhalten.

#### 3.1.1 Durchführung

Im ersten Schritt soll das Ultraschallmessgerät angeschlossen werden, indem der Messumformer der Firma Flexim mit den Sensoren verbunden wird. Zuvor müssen die Sensoren durch Anklemschuhe an einer Schiene befestigt werden, welche anschließend an das Rohr mit dem zu messenden Fluid angebracht wird. An der Schnittstelle zwischen den beiden Sensoren und dem Rohr muss eine Koppelpaste aufgetragen werden. Die Koppelpaste hat die Aufgabe die Sensoren mit der Oberfläche des Prüfstandes zu verbinden, da sonst das Signal zu schwach wäre oder nicht aufgenommen werden könnte. Weiterhin ist beim Anbringen der Sensoren auf den genauen Abstand zu achten. Dieser Abstand wird durch verschiedene Parameter, die in den Messumformer eingegeben werden, berechnet.

Folgende Parameter müssen manuell in den Messumformer eingegeben werden:

Kanal	A
Außendurchmesser	32 mm
Wanddicke des Rohres	2,4 mm
Rohrmaterial	PVC
Rauigkeit	0
Medium	Wasser
Auskleidung	keine
Medium Temperatur	25 °C
Temperaturfühler	Ohne

Messgröße	Volumenstrom
Druck	1 bar
Stromschleife	nein
Messeinheit	l/min
Dämpfung	10 s
Schallweg	4

**Tabelle 4: Parameter für dem Messumformer**

Bei der Anbringung der Sensoren sollte darauf geachtet werden, dass diese bei einem horizontal angebrachten Rohr an der unteren Seite des Rohres oder seitlich am Rohr befestigt werden. Die Sensoren müssen generell in Strömungsrichtung angebracht werden (siehe Pfeilmarkierung auf Sensoren). Auf Störquellen wie T-Rohrleitung und einer ausreichenden Ein- und Auslaufstrecke ist zu achten.

Nachdem das Ultraschallmessgerät angebracht wurde, kann nun mit der Messung begonnen werden. Der Coriolis-Massendurchflussmesser dient durch seine Genauigkeit als Referenz für die anderen Durchflussmesser.

Als Erstes wird die Pumpe eingeschaltet und die Messsoftware gestartet. Nun soll das Fluid mittels der entsprechenden Ventile durch die Leitung der Ultraschallmessung geleitet werden. Anschließend soll der Fluidstrom durch die jeweiligen anderen Leitungen der verschiedenen Messsysteme geleitet werden. Die einzelnen Messungen sollten mindestens über einen Zeitraum von 2min erfolgen. Es ist stets auf die richtige Stellung der Ventile zu achten. Der Schwebkörper-Durchflussmesser wird nicht digital erfasst und muss manuell abgelesen werden.

## **3.2 Störung durch Luftstrom**

Im zweiten Versuch soll eine Störung mittels eines Luftstromes simuliert werden. Hierbei sollen die Unterschiedlichen Reaktionen beim Coriolis-Massendurchflussmesser und dem Ultraschallmessgerät verglichen werden.

### **3.2.1 Durchführung**

Zu Demonstrationszwecken wurde eine Druckluftleitung an die Ringleitung des Systems angeschlossen. Über diese Leitung kann ein geregelter Luftstrom dem Fluid beigemischt werden und so eine Störung simuliert werden. Der Einfluss dieser Störung soll am Coriolis- und Ultraschallmessverfahren gezeigt werden. Nachdem die Ventile in die richtige Stellung gebracht wurden kann die Luft in das System eingeblasen werden. Auch hier sollte der Messzeitraum



auf 2min gelegt werden. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt über die Software.

### **3.3 Auswertung**

Bei der Auswertung sollen die fünf unterschiedlichen Messsysteme miteinander verglichen und der Einfluss von Störungen auf die Messsysteme beschrieben werden. Die Messungen und Beobachtungen sollen interpretiert und diskutiert werden.

## **4 Volumenstrommessung**

Raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) sind sowohl in Produktionshallen als auch in Bürogebäuden oder privaten Haushalten vorzufinden. In diesem Versuch soll die Luftgeschwindigkeit in einer Rohrleitung gemessen werden. In der Praxis werden derartige Messungen z.B. bei Lüftungsanlagen durchgeführt, um den optimalen Betrieb zu gewährleisten. Die DIN EN 12599 gibt u.a. vor welche Verfahren und Messgeräte zur Prüfung der Gebrauchstauglichkeit von RLT-Anlagen zulässig sind. In diesem Versuch werden zwei Flügelradanemometer (14mm und 105mm Kopf) und ein Prandtl-Staurohr verwendet.

### **4.1 Durchführung**

Als Erstes soll die Geschwindigkeit des Volumenstroms gemessen werden. Dazu wird zunächst das Gebläse eingeschaltet. Anschließend wird am Luftauslass mit dem Flügelradanemometer (105mm) die Geschwindigkeit gemessen. Zusätzlich zu dieser Messung, soll auch die Strömungsgeschwindigkeit mit der kleinen Flügelradsonde und dem Staurohr gemessen werden. Diese sollen über die vorhandenen Löcher in das Rohr geführt werden. Da über den Rohrquerschnitt keine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung vorliegt, muss an mehreren Punkten gemessen werden. Für die Bestimmung dieser Messpunkte soll die DIN EN 12599 zur Hilfe genommen werden. (Hinweis: Es kann eine Unsicherheit von 15/5 angenommen werden)

Als zweiter Schritt wird die Geschwindigkeit der Strömung in einem kleineren Rohrdurchmesser ermittelt. Dazu muss ein Teil des Rohres durch ein Rohr mit einem kleineren Durchmesser ersetzt werden. Es sollen dieselben Messungen wie im ersten Schritt durchgeführt werden.

Weiter soll die Flügelradsonde in der Mitte des Rohrquerschnittes um verschiedene Winkel gedreht und geneigt werden. Es sind die Geschwindigkeiten in Abhängigkeit des Drehwinkels aufzuzeichnen.

Winkel	30°	45°	90°
Geschwindigkeit [m/s]			

**Tabelle 5: Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Drehwinkel**

## **4.2 Auswertung**

Bei der Auswertung sollen die unterschiedlichen Messsysteme mit einander verglichen werden. Dazu sollen die Messdaten und -ergebnisse dienen. Die Messungen und Beobachtungen sollen interpretiert und diskutiert werden.

## **5 Leistungsmessung**

Im Versuch sollten die elektrischen Betriebsdaten (Strom, Spannung, Wirk-, Blind- und Scheinleistung) z.B. eines mit Dreiphasenwechselstrom betriebenen Kompressors mit angeschlossener Kühlanlage gemessen werden. Oftmals brauchen größere Maschinen ca. 75% ihrer Nennleistung im Normalbetrieb. Im Allgemeinen ist eine vorherige Abschätzung eines realistischen Leistungsbedarfs einer Maschine auch mit Hilfe von Expertenmeinungen wichtig, um gravierende Messfehler unmittelbar zu erkennen. Ziel dieses Versuchs ist es, die elektrische Leistung der zu untersuchenden Anlage während des Betriebes zu ermitteln und weiterhin die gemessene elektrische Leistung mit der auf dem Typenschild angegebenen Leistung zu vergleichen.

Das Anschlusskabel der Anlage ist mit einem Strom- und Spannungsmessadapter ausgestattet. Zur Messung der elektrischen Spannung wird jede einzelne Phase des 5-Adrigen Stromkabels mittels der vorbereiteten Messstelle abgegriffen, hierzu stehen drei Kabel (rot / gelb / grün) sowie ein blaues Kabel für den Nullleiteranschluss zur Verfügung. Zur Strommessung werden 3 Strommesszangen und ein Strommessgerät (Datenlogger C.A. 8332B) bereitgestellt.

### **5.1 Durchführung**

Zu Beginn der Versuchsdurchführung, müssen die Messzangen und Kabel an das Messgerät und an die jeweiligen Messadapter angeschlossen werden. Bei den Messzangen ist auf die Flussrichtung am Messadapter zu achten. Auch die zu erfassenden Messdaten müssen am Messgerät eingestellt werden (100A, 3-Leiter Anschluss, Periode 1). Hierzu kann das Handbuch zur Hilfe genommen werden. Durch das Messgerät wird nun, über einen Zeitraum von einer Minute sekundliche Werte für Stromstärke, Spannung und Leistung der drei Leiter aufgezeichnet.

### **5.2 Auswertung**

Bei der Auswertung sind die ermittelten Messdaten der einzelnen Messparameter darzustellen. Die Messungen und Beobachtungen sollen interpretiert und diskutiert werden.

## 6 Theorie

### 6.1 Temperaturmessung

#### 6.1.1 Allgemein

„Die Erfassung der Temperatur ist in zahlreichen Prozessen von überragender Bedeutung. Ca. 45 % aller benötigten Messstellen fallen dabei auf die Temperatur. Man denke an Schmelzen, chemische Reaktionen, Lebensmittelverarbeitung, Energiemessung und Klimatisierung. So unterschiedlich die genannten Bereiche sind, so verschieden sind auch die Aufgabenstellungen an die Temperatursensoren, ihre physikalischen Wirkungsprinzipien und technische Ausführung.

In Industrieprozessen ist der Messort vielfach weit vom Ort der Anzeige entfernt, da beispielsweise bei Schmelz- und Glühöfen die Prozessbedingungen dies erfordern oder eine zentrale Messwerterfassung gewünscht ist. Oft ist auch eine weitere Verarbeitung des Messwertes in Reglern oder Registriergeräten gefordert. Hier eignen sich keine direkt anzeigenden Thermometer, wie man sie aus dem Alltag kennt, sondern nur solche, welche die Temperatur in ein anderes, ein elektrisches Signal umformen. Übrigens spricht man auch bei diesen elektrischen Messwertaufnehmern weiterhin von Thermometern, wobei streng genommen immer der Messwertgeber, bestehend aus Sensorelement und die ihn umgebende Schutzarmatur, gemeint ist.

In der industriellen elektrischen Temperaturmessung sind Pyrometer, Widerstandsthermometer und Thermoelemente üblich. Daneben existieren noch Erfassungssysteme wie Schwingquarz-Sensoren und faseroptische Systeme, denen bislang der Einzug in die Industrie jedoch noch nicht gelungen ist.“

#### 6.1.2 Temperaturerfassung

Die Temperatur ist eine Größe von außerordentlicher Bedeutung für technische Prozesse. Von der Temperatur hängen sehr viele Stoffeigenschaften ab. Der thermische Zustand eines Stoffes kann grundsätzlich nach zwei physikalischen Prinzipien bestimmt werden:

- Kontaktthermometrie
- Pyrometrie

Bei der Thermometrie wird der Temperatursensor mit dem Medium oder der Oberfläche des Körpers, deren Temperatur bestimmt werden soll, ins thermodynamische Gleichgewicht gebracht. Anschließend wird die Temperatur des Sensors mit einem temperaturabhängigen Effekt ermittelt. Der Temperaturausgleich erfolgt über Konvektion, Wärmeleitung oder Wärmestrahlung.

Bei der Pyrometrie wird die Wärmestrahlung eines gasförmigen, flüssigen oder festen Körpers verwendet, um den Temperatursensor zu erwärmen. Aus der Temperatur, welche der Temperatursensor annimmt, wird auf die Temperatur der Wärmestrahlungsquelle geschlossen. Im industriellen Bereich werden Pyrometer für Temperaturen über 800 °C eingesetzt. Es ist aber auch möglich, mit diesem Prinzip Temperaturen bis - 100 °C zu messen, beispielsweise bei schlecht zugänglichen Messstellen oder an bewegten Teilen.

Der Begriff „Temperatursensor“ fasst alle Sensoren zusammen, die der Temperaturmessung dienen. Als Messeffekt kommen folgende Erscheinungen in Frage:

- Ausdehnung von festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern in Abhängigkeit von der Temperatur (Ausdehnungsthermometer).
- Änderung des Widerstandes bzw. der elektrischen Leitfähigkeit (Widerstandsthermometer).

*Positiver Temperaturkoeffizient:* Metalle bereichsweise linear, keramische Halbleiter stark nichtlinear

*Negativer Temperaturkoeffizient:* Keramische Halbleiter nichtlinear

- Potentialdifferenz am Kontakt zweier Metalle mit verschiedener Thermospannung (Thermoelemente, bereichsweise linear)
- Änderung der Eigenfrequenz schwingender Quarze als Funktion der Temperatur
- Emission und Absorption einer Infrarotstrahlung.“

### 6.1.3 Thermoelemente

„Thermoelemente eignen sich für Temperaturmessungen im Bereich von - 200°C bis nahezu +2000°C. Sie sind damit auch zur Messung sehr hoher Temperaturen geeignet. Physikalisch ist der Thermoeffekt, früher auch Seebeck-Effekt bezeichnet, ein Ladungsträgerdiffusionseffekt, bei dem sich die La-

Träger, im Metall die Elektronen, entsprechend dem Temperaturgradienten auf dem Leiter verteilen. Die Elektronen werden aus Bereichen höherer Temperatur zu Bereichen niedrigerer Temperatur gedrängt, wodurch sich ein elektrisches Feld ausbildet. Werden eine geschlossene Leiterschleife aus zwei unterschiedlichen Materialien gebildet und die Verbindungsstellen auf verschiedene Temperaturen gebracht, so ergeben sich auf jedem Leiter als Längsintegral Spannungen und an einer beliebigen Trennstelle der Schleife aus beiden eine Spannungsdifferenz, die Thermospannung. Die Enden der Trennstelle müssen auf gleicher Temperatur sein! Bei zwei gleichen Materialien ist die Spannungsdifferenz null! Das Werkstoffleiterpaar bezeichnet man als Thermopaar oder Thermoelement. Thermoelemente können nur Temperaturdifferenzen messen. Um damit eine Temperatur zu messen, bringt man die eine Verbindungsstelle, die Messstelle, auf die unbekannte Temperatur und die andere auf eine bekannte, z.B. 0°C, die auch Vergleichsstelle genannt wird (elektronische Vergleichsstellen).“

### Thermoelementwerkstoffe

„Die Abhängigkeit der Thermospannung von der Temperatur (-Differenz) ist leider nichtlinear. Für eine ganze Reihe von Werkstoffpaarungen sind diese Abhängigkeiten in sogenannten Grundwertreihen genormt, DIN IEC 584. Oft werden das Eisen-Konstantan-Thermoelement, bezeichnet mit Typ J, und das Nickelchrom-Nickel-Thermoelement, Typ K. Typ J hat eine hohe Thermospannung/°C (Temperaturkoeffizient), kann aber nur bis etwa 700°C ohne Einschränkung eingesetzt werden. Außerdem hat es ein ungünstiges Langzeitverhalten. Das weitaus am häufigsten eingesetzte Thermoelement ist der Typ K. Es hat einen sehr großen Messbereich von -200°C bis etwa 1000°C (mit Einschränkungen auch darüber) und ist wenig nichtlinear. Für höhere Temperaturen setzt man Thermoelemente aus Edelmetallen ein, z.B. aus Platinrhodium-Legierungen und Platin, Typ R.“

Norm	Element	Maximaltemperatur	definiert bis
	Fe-CuNi J	750°C	1200°C
	Cu-CuNi T	350°C	400°C
	NiCr-Ni K	1200°C	1370°C
DIN EN 60 584	NiCr-CuNi E	900°C	1000°C
	NiCrSi-NiSi N	1200°C	1300°C
	Pt10Rh-Pt S	1600°C	1540°C
	Pt13Rh-Pt R	1600°C	1760°C
	Pt30Rh-Pt6Rh B	1700°C	1820°C

Tabelle 6: Thermoelemente nach DIN EN 60 584

#### 6.1.4 Widerstandthermometer

„Die elektrische Leitfähigkeit eines Metalls basiert auf der Beweglichkeit der Leitungselektronen, dem so genannten Elektronengas. Wird eine Spannung an die Enden eines Metalls gelegt, bewegen sich die Elektronen zum Pluspol. Fehler in der Kristallstruktur des Metalls stören diese Bewegung. Hierzu zählen fremde oder fehlende Gitteratome, Korngrenzen und Atome auf Zwischengitterplätzen. Da diese Fehlstellen temperaturunabhängig sind, ergeben sie einen konstanten Widerstand. Mit wachsender Temperatur schwingen die Atome des Metallgitters verstärkt um ihre Ruhelage und behindern dadurch die Bewegung der Leitungselektronen. Da diese Bewegung linear mit der Temperatur zunimmt, hängt die dadurch verursachte Widerstandszunahme in erster Näherung direkt von der Temperatur ab, man spricht von einem positiven Temperaturbeiwert oder -koeffizienten, einem PTC-Widerstand.

Um diesen Effekt zur Temperaturmessung verwenden zu können, ist ein großer Temperaturkoeffizient, d. h. eine möglichst große Änderung des Widerstandes mit der Temperatur, ideal. Andererseits sollen sich die charakteristischen Eigenschaften des Metalls nach Möglichkeit auch in langen Zeiträumen wenig ändern. Der Temperaturkoeffizient sollte weiterhin möglichst temperatur- und druckunabhängig sowie durch chemische Einflüsse nicht beeinflussbar sein.

Der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem elektrischen Widerstand ist allgemein nicht direkt proportional, sondern wird durch ein Polynom höherer Ordnung beschrieben:

Formel 14: 
$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots)$$

Der Widerstand  $R_0$  bildet den Nennwiderstand und wird bei einer noch festzulegenden Temperatur bestimmt. Die Terme höherer Ordnung ( $T^2$ ,  $T^3$ ...) werden je nach Genauigkeit der Messung berücksichtigt. Die Koeffizienten A, B usw. hängen vom Widerstandsmaterial ab und beschreiben die Temperatur-/Widerstandsabhängigkeit eindeutig.“

#### Platinwiderstände

„Als Widerstandsmaterial hat sich in der industriellen Messtechnik Platin durchgesetzt. Zu seinen Vorteilen zählen die hohe chemische Beständigkeit, vergleichsweise leichte Bearbeitbarkeit (insbesondere zur Drahtherstellung),

die Möglichkeit der hochreinen Darstellung und die gute Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften. Diese Eigenschaften werden in der europäischen Norm DIN EN 60 751 vollständig festgelegt, sodass für den Platinmesswiderstand wie kaum einen anderen Temperatursensor eine universelle Austauschbarkeit besteht.

Zu diesen Festlegungen zählen die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes, die in einer Grundwertreihe festgeschrieben ist, der Nennwert sowie die zugehörige Bezugstemperatur und die zulässigen Grenzabweichungen. Auch der Temperaturbereich wird in der Norm festgelegt, er reicht von  $-200$  bis  $+850^{\circ}\text{C}$ . Bei der Festlegung der Grundwertreihe unterscheidet man zwei Temperaturbereiche:

- $-200^{\circ}\text{C}$  bis  $0^{\circ}\text{C}$ ,
- $0^{\circ}\text{C}$  bis  $850^{\circ}\text{C}$ .

Widerstand/Ohm

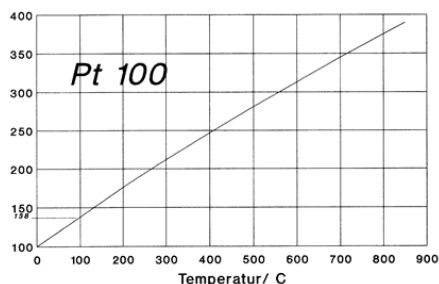


Abbildung 3: Kennlinie eines Pt 100–Temperatursensors

Für den Temperaturbereich von  $-200 \dots 0^{\circ}\text{C}$  gilt ein Polynom dritten Grades:

Formel 15:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot [T - 100^{\circ}\text{C}] \cdot T^3)$$

Für den Bereich von  $0$  bis  $850^{\circ}\text{C}$  gilt ein Polynom zweiten Grades:

Formel 16:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$$



Für die Koeffizienten gilt:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = - 5,775 \cdot 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = - 4,183 \cdot 10^{-12} \cdot ^\circ\text{C}^{-4}$$

Die Größe  $R_0$  wird als Nennwert oder Nennwiderstand bezeichnet und ist der Widerstandswert bei  $0^\circ\text{C}$ . Gemäß DIN EN 60 751 ist für den Nennwert ein Wert von  $100 \Omega$

definiert, man spricht daher vom Pt 100–Widerstand. Zulässig sind auch die Vielfachen von diesem Wert, so werden Messwiderstände mit Nennwerten von  $500 \Omega$  und  $1000 \Omega$  angeboten. Ihr Vorteil liegt in einer höheren Empfindlichkeit, das heißt einer stärkeren Änderung ihres Widerstandes mit der Temperatur (Pt 100: ca.  $0,4 \Omega/\text{K}$ ;

Pt 500: ca.  $2,0 \Omega /\text{K}$ ; Pt 1000:  $4,0 \Omega/\text{K}$ ).

Weiterhin ist in der Norm ein Pt 10–Widerstand definiert, der wegen seiner geringen Empfindlichkeit jedoch relativ selten Anwendung findet und dessen Einsatztemperatur oberhalb  $600^\circ\text{C}$  liegt. Zumeist findet man kleinere Nennwerte (z. B.:  $25 \Omega$ ,  $10 \Omega$ ,  $2,5 \Omega$  oder  $0,25 \Omega$ ) bei Präzisionsthermometern, die aber dann die Forderungen der ITS 90 erfüllen und für Messungen mit sehr kleinen Messunsicherheiten eingesetzt werden. Auf Grund ihres filigranen und mechanisch sehr empfindlichen Aufbaus können diese Thermometer nicht im industriellen Bereich eingesetzt werden.“

### 6.1.5 Messunsicherheit

#### Fehler durch die Auswertelektronik

„Temperatursensoren sind stets analog, d.h. Temperaturmessung ist nur indirekt und analog möglich. Das Sensorsignal muss erst analog aufbereitet werden, bis es digital umgesetzt werden kann. Digitale Temperaturmessung ist streng genommen nicht möglich. Man darf sich durch hohe digitale Auflösungen nicht täuschen lassen, die Messunsicherheit wird nicht verbessert. Sie kann nie besser als der Sensor mit der analogen Signalaufbereitung sein!“

#### Eigenerwärmungsfehler

„Ein nur bei Widerstandsthermometern auftretender Fehler ist der Eigenerwärmungsfehler. Da die Messung eines elektrischen Widerstandes nur über den Spannungsabfall eines Messstromes am Widerstand möglich ist, ist es unvermeidbar, dass durch Strom eine Leistung (Energie) in den Widerstand eingebracht wird. Diese Messleistung entspricht einer Wärmequelle im Inneren des Thermometers und erzeugt einen Wärmestrom in seine Umgebung und damit eine Übertemperatur des Sensors.“

### **„Falsche“ Kennlinien**

„Sowohl Thermoelemente und Widerstandsthermometer als auch Pyrometer haben nichtlineare Kennlinien. Gern werden in Messformen Linearisierungen der Kennlinien vorgenommen, sodass das Ausgangssignal temperaturproportional wird. Bei Thermoelementen die Nichtlinearität des Thermoelements berücksichtigen muss, wenn die Vergleichsstellentemperatur einen anderen Wert als 0°C hat!

Die Nichtlinearität der Kennlinien wird bei der Weiterverarbeitung unterschiedlich behandelt. Bei geringen Nichtlinearitäten und kleineren Messbereichen genügt oft eine gewisse Zahl von Stützstellen und dazwischen stückweise Geraden, um die entstehende Abweichung innerhalb der geforderten maximal zulässigen Abweichung zu halten. Mit den zunehmenden Möglichkeiten der modernen Elektronik und entsprechendem Einsatz leistungsfähiger Mikrocontroller werden immer häufiger Algorithmen programmiert, die die Kennlinien mathematisch annähern, meist durch Potenzfunktionen.“

### **Fehler durch schnelle Gasströmung**

„Der Standardeinbau eines Thermometers erfolgt quer zur Strömungsrichtung (günstiges Zeitverhalten!), womit es ein Hindernis für die Strömung darstellt. An der Oberfläche staut sich das Medium zur Geschwindigkeit  $w = 0$ , seine kinetische Strömungsenergie wird in eine Temperaturerhöhung umgewandelt. Bei idealem adiabatem Verhalten dieser Umwandlung wäre die Temperaturerhöhung dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit proportional, aber leider ist durch Reibungseffekte und Wärmeleitung nur ein schwer berechenbarer Teil am Thermometer wirksam. Dieser Effekt wird, nicht ganz korrekt, mit Recovery-Effekt bezeichnet. Der Anteil beträgt je nach Konstruktion der Thermometer zwischen 60 und 90% der adiabaten Erhöhung. Bei hohen Geschwindigkeiten kann der Fehler beträchtlich sein, z.B. beträgt die adiabate Temperaturerhöhung bei  $w = 50 \text{ m/s}$  1,2°C.

Bei Präzisionsmessungen muss dieser Effekt also auch bei niedrigeren Geschwindigkeiten berücksichtigt werden. Für sehr hohe Geschwindigkeiten um-

hüllt man die Thermometer mit einer kammerartigen großen Geschwindigkeitsbereich etwa konstant hält, so dass man diesen rechnerisch leicht berücksichtigen kann. Man kann auch die Geschwindigkeit gesondert messen und den Messwert entsprechend der (bekannten) Umwandlungscharakteristik korrigieren.“

#### **6.1.6 Kalibrieren von Thermometern**

"Im Laufe der Betriebsdauer eines Thermometers ergeben sich infolge chemischer und mechanischer Einflüsse sowie Alterungserscheinungen wie Rekristallisationen und Diffusionen, Änderungen der Kennlinie gegenüber dem Auslieferungszustand. Auch geringfügig unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten des Träger- und des Widerstandsmaterials lassen die Kennlinie driften. Die Größe der Änderung hängt sehr stark von der Art dieser Belastungen und der Konstruktion selbst ab. Um eine Drift berücksichtigen und kompensieren zu können, muss das Thermometer in regelmäßigen Zeitabständen kalibriert werden. Eine derartige Kalibrierung bedeutet eine Überprüfung der angezeigten Temperaturwerte und gegebenenfalls die Festschreibung der Werte, um die sie von den tatsächlichen Messtemperaturen abweichen. (...)

Eine Kalibrierung ist gleich bedeutend mit einer individuell für jedes Thermometer geprüften und gemessenen Genauigkeit. Für die Langzeitstabilität dieser Werte kann allerdings vom Hersteller keine Garantie übernommen werden, da er die zukünftigen Einsatzgebiete bzw. -häufigkeiten und die damit verbundenen Belastungen auf das Thermometer nicht voraussehen kann. Eine Gültigkeitsdauer der Kalibrierung oder eine turnusmäßige Kontrolle durch die DKD sind nicht vorgeschrieben. Anfangs sollte ein Thermometer jährlich kalibriert werden und die Messergebnisse mit den vergangenen Daten verglichen werden. So wird im Lauf der Zeit eine Historie des Thermometers gewonnen, aus der dessen Stabilität ersichtlich wird. Bei einer für den Anwendungsfall genügenden Reproduzierbarkeit der Messdaten kann dann auf eine kürzere oder längere Wiederholungszeit der Kalibrierung geschlossen werden.

Die Frage nach dem Ablauf und der Genauigkeit einer Kalibrierung lässt sich nicht generalisierend beantworten. Es findet stets eine Abstimmung zwischen dem Anwender und der Kalibrierstelle statt, wobei Temperaturbereiche und Messpunkte festgelegt werden. Die Messgenauigkeit wird durch die Art der Messung und den Prüfling bestimmt.

Zur Kalibrierung wird das zu prüfende Thermometer auf eine bekannte Temperatur gebracht, der von ihm verursachte Wert (Widerstand, Thermospannung...) ermittelt und mit dem zu erwartenden Wert verglichen. Zur Temperierung werden je nach gefordertem Bereich flüssigkeitsgefüllte Thermostatbäder, Öfen oder Fixpunktzellen benutzt. Die Temperatur wird dabei mit einem Normalthermometer gemessen, wobei während der Vergleichsmessung darauf geachtet werden muss, dass kein Temperaturunterschied zwischen Prüfling und Normalthermometer entsteht. Bei einer Fixpunktzelle stellt sich die genau bekannte Temperatur des Phasenwechsels ein; ein Vergleich mit einem Normalthermometer entfällt. Fixpunktzellen bieten eine größere Genauigkeit; bei Tripelpunktzellen mit Wasser lässt sich eine Messunsicherheit unter 5 mK erreichen.“

## 6.2 Thermografie

### 6.2.1 Strahlungsphysikalische Grundlagen

„Für die von Wellenlänge  $\lambda$ , Temperatur  $T$  und der Ortskoordinate  $(x,y)$  abhängigen strahlungsphysikalischen Parameter Absorptionsgrad  $\alpha$ , Reflexionsgrad  $\rho$  und Transmissionsgrad  $\tau$  von Messobjekten bzw. deren Oberfläche, aber auch von Zwischenmedien, gilt die Gleichung:

$$\alpha(\lambda, T, x, y) + \rho(\lambda, T, x, y) + \tau(\lambda, T, x, y) = 1$$

Für undurchlässige, nicht transparente Körper folgt demnach nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz:

$$\alpha(\lambda, T, x, y) = 1 - \rho(\lambda, T, x, y) = \varepsilon(\lambda, T, x, y)$$

Ferner kann bezüglich des Emissionsgrades  $\varepsilon$ , der im Allgemeinen auch ortsabhängig angenommen werden muss, zwischen (örtlich) Schwarzen Strahlern (linke Gleichung),

sogenannten grauen Strahlern (rechte Gleichung)

$$\varepsilon(\lambda, T, x, y) = \varepsilon(x, y) = 1 \quad \varepsilon(\lambda, T, x, y) = \varepsilon(x, y) < 1$$

Und selektiven Strahlern mit stark wellenlängenabhängigen Emissionsgrad unterschieden werden.“ (Handbuch der technischen Temperaturmessung – Bernhard)

### 6.2.2 Fehlerquellen

- „Emissionsgrad  $\epsilon(\lambda, T, x, y) \leq 1$  und Absorptionsgrad  $\alpha(\lambda, T, x, y) \leq 1$  des Objektes bzw. der Objekte in der Messszene und ihre örtliche Verteilung (siehe Abschnitt 13.7):
- Richtungsselektivität des Strahlers,
- Strahlung aus dem Volumen oder vom Hintergrund bei transparenten oder semitransparenten Messobjekten,
- Direkte oder vom Messobjekt reflektierte Fremdstrahlung von Objekten anderer Temperatur (siehe Abschnitt 13.6.1),
- Strahlung der Gehäuse-Innenseite, des Objektivs, der Filter sowie der Blenden,
- Transmissionsgrad der Übertragungstrecke (siehe Abschnitt 13.13.2), der Optik  $\tau_O(\lambda) \leq 1$  und von Filtern  $\tau_F(\lambda) \leq 1$ ,
- Gerätebezogene Einflussfaktoren (sofern sie nicht bei der Kalibrierung berücksichtigt werden oder sich beim Einsatz ändern),
- Abbildungsfehler der Optik,
- Örtliche Verteilung der (spektralen) Empfängerempfindlichkeit (z.B. Randeinfluss),
- Drift und Kennlinien- bzw. Kalibrationsfehler bzw. Unsicherheit der approximierten Kennlinie sowie des Detektors und der Messwertverarbeitungsglieder,
- Rauschen der elektronischen Baugruppen.“ (Handbuch der technischen Temperaturmessung – Bernhard)

## 6.3 Durchflussmessung

### 6.3.1 Ultraschall Durchflussmesser

Beim Ultraschallmessverfahren werden schräg gegenüberliegend jeweils Sensoren und Empfänger am Messrohr angebracht. Die Sender senden akustische Signale aus, welche von den gegenüberliegenden Empfänger aufgenommen werden. Schallsignale breiten sich in ruhenden Fluiden mit Schallgeschwindigkeit aus. Bei einem strömenden Medium nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Strömungsrichtung zu und entgegen der Strömungsrichtung ab. Aus diesem Grund verändert sich die Zeit, welche das Schallsignal für die Überwindung der Strecke von Sender zu Empfänger benötigt.

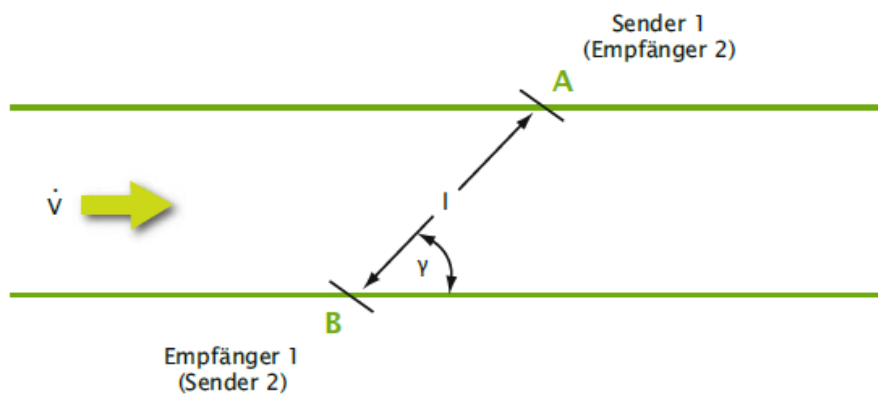


Abbildung 4: Durchflussmessung mittels Ultraschall

Subtrahiert man die Zeitgleichung für die Ausbreitung des Schalls mit und gegen die Strömungsrichtung, wird die Schallgeschwindigkeit aus der entstehenden Gleichung eliminiert und man erhält die Formel:

$$c_{F,m} = \frac{l}{\cos \gamma} \cdot \left( \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)$$

Die Durchflussgeschwindigkeit des Fluides ist somit abhängig von der Strecke zwischen Sender und Empfänger, dem Winkel in dem diese zu einander stehen und Zeiten, welche der Schall für die Überwindung der Strecke zwischen Sender und Empfänger, in und gegen Strömungsrichtung, benötigt.

### 6.3.2 Coriolis Durchflussmesser

Das Coriolismessverfahren macht sich die Corioliskraft zunutze. Sie entsteht durch die Überlagerung von translatorischen und rotatorischen Kräften. Ein U-förmiges Rohr wird durch eine Erregung in sinusförmige Schwingung versetzt. Durch einen Massenfluss (translatorische Bewegung) überlagern sich die beiden Kräfte, wodurch die Corioliskraft entsteht. Die Verdrehung des U-Rohrs wird über sensible Sensoren registriert. Somit kann durch die Umstellung der Formel direkt der Massenstrom ermittelt werden.

$$\vec{F}_{Co} = -2m \cdot (\vec{c}_F \cdot \vec{\omega})$$

Das Messverfahren ist prinzipiell für alle Durchflüsse geeignet, stößt aber bei kleineren Gasdurchflüssen an seine Grenzen.

### 6.3.3 Wirbelstrom Durchflussmesser

Das Wirbelstromverfahren nutzt das Prinzip der Kármán'schen Wirbelstraße. Innerhalb des Messrohrs befindet sich ein Staukörper. Wird dieser Körper angeströmt bilden sich abwechselnd beidseitige Wirbel mit entgegengesetzten

Drehsinn. Die Frequenz der Wirbelablösung verhält sich proportional zum Volumenstrom. Es ist also keine Errechnung des Volumenstroms anhand von Rohrdurchmesser und Durchflussgeschwindigkeit notwendig.

Die Frequenz der Wirbelablösung kann leicht erfasst werden. Die Wirbel bilden einen lokalen Unterdruck. Die entstandenen Druckschwankungen werden mit Hilfe von kapazitiven bzw. piezoresistiven Druckaufnehmern erfasst. Geeignet ist das Verfahren sowohl für Gase und Dämpfe, als auch für Flüssigkeiten. Da Wirbelstromverfahren keine Drift haben, eignen sie sich sehr gut für Langzeitmessungen.

#### 6.3.4 Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser

Bei dem Magnetisch-Induktiven Verfahren wird durch zwei Feldspulen zu beiden Seiten des Messrohrs ein Magnetfeld mit konstanter Stärke erzeugt. Der zu messende Volumenstrom fließt durch das erzeugte Magnetfeld. Laut dem Faradayschen Induktionsgesetz wird in einem Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, eine Spannung induziert. Diese Spannung ist proportional zur Stärke des Magnetfeldes und zur Durchflussgeschwindigkeit.

$$U = k \cdot B \cdot D \cdot c_F$$

Da die Stärke des Magnetfeldes bekannt ist, kann anhand dieser Formel leicht auf die Durchflussgeschwindigkeit geschlossen werden. Anhand dieser und dem Durchmesser des Messrohres lässt sich der Volumenstrom bestimmen.

Dieses Messverfahren kann nur bei Flüssigkeiten mit einer elektrischen Leitfähigkeit von mindestens  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$  eingesetzt werden. Dieser Wert wird bei Wasser jedoch fast nie unterschritten. Nicht möglich sind beispielsweise Volumenstrommessungen mit Öl als Fluid.

#### 6.3.5 Schwebekörper Durchflussmesser

Der Schwebekörperdurchflussmesser ist ein analoges Messgerät, welches oft nur als Kontrollinstrument verwendet wird, da es nicht die höchste Genauigkeit aufweist. Der Schwebekörperdurchflussmesser besteht aus einem konischen Messrohr, in dem ein Schwebekörper vertikal befestigt ist. Auf dem Messrohr befindet sich eine Skalierung, die jeweils nur für bestimmte Fluide oder Gase gültig ist. Durch die Bauweise tritt in Abhängigkeit von der Höhe des Schwebekörpers ein sich ändernder  $c_w$ -Wert auf. Die Skalierung ist darauf ausgelegt, dass durch ein spezifisches, strömendes Fluid eine Druckkraft auf den Schwebekörper ausgeübt wird, welche den Körper steigen lässt. Somit

wird der Volumendurchfluss (bei gegebener konstanter Dichte) physisch sichtbar und ablesbar.

## 6.4 Volumenstrommessung

### 6.4.1 Staudruckverfahren

Staudruckverfahren zeichnen sich durch ihre einfache Bauweise und günstige Kosten aus. Das bekannteste Messgerät ist das so genannte Prandtl-Staurohr. Es misst über zwei unterschiedliche Entnahmestellen gleichzeitig den Staudruck und den statischen Druck in einer Strömung. Hieraus kann wieder über die Bernoulli-Gleichung die Geschwindigkeit berechnet werden zu:

$$c_F = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_{stau} - p_{stat})}$$

Der Staudruck ergibt sich durch vollständiges Abbremsen der Strömung in Messstutzen. Bei bekanntem Querschnitt errechnet sich der Volumenstrom ebenfalls aus der Konti-Gleichung. Entscheidend ist aufgrund des Strömungsprofils auch hier die richtige Entnahmestelle. Entweder müssen mehrere Messungen über den gesamten Strömungsquerschnitt erfolgen, oder man misst das Geschwindigkeitsmaximum in der Strömungsmittelpunkt und rechnet sich in Abhängigkeit von der Strömungsart (laminar oder turbulent) die mittlere Geschwindigkeit aus. Letzteres reicht zumindest für eine erste überschlägige Messung aus.

### 6.4.2 Flügelradanemometer

„Ein Flügelrad-Anemometer ist im Prinzip eine kleine, nahezu freilaufende Windkraftanlage: Bei hindurchströmendem Fluid dreht sich der Rotor gerade so schnell, dass die meist sechs bis zehn steil angestellten Blätter fast parallel zur Blattfläche angeströmt werden. Der potenziell viel größere Auftrieb gleicht lediglich den Strömungswiderstand und die Reibung der Lagerung und ggf. einer Anzeigevorrichtung aus. Für einen niedrigen Anlaufwiderstand ist das Rad sehr leicht gebaut und die Achse dünn; ein umgebender zylindrischer Ring dient dem mechanischen Schutz. Bei modernen Instrumenten mit optischem oder magnetischem Geber kann das Flügelrad kleiner (bis hinunter zu 14 mm Durchmesser) ausfallen, da kein Zählwerk oder Wirbelstromtachometer angetrieben werden muss. Die zu messende Geschwindigkeit der Strömung wird bei modernen Geräten elektronisch aus der Winkelgeschwindigkeit des



Flügelrades errechnet, bei älteren Geräten wurde dies mechanisch auf eine Anzeige übertragen, die für die zur Winkelgeschwindigkeit des Flügelrades passende Angabe skaliert ist.

Flügelrad-Anemometer eignen sich zur Messung schwacher Strömungen, halten aber wegen ihres Leerlaufs auch schnelle Strömungen und den Betrieb in Flüssigkeiten aus. Handgeräte sieht man im Einsatz beim Flug- und Segelsport, im privaten Gebrauch, aber auch im professionellen Einsatz unter anderem in der Lüftungs- und Heizungstechnik. Stationäre Flügelrad-Anemometer zur Windmessung benötigen eine Windrichtungsnachführung. Sie sind besser als Schalenanemometer für den Betrieb mit generatorischen Gebern geeignet.“ (Wiki)

„Flügelradanemometer sind seit 1752 bekannt und bestehen aus einem System geneigter Platten, die an einer horizontalen Achse befestigt sind. Das Flügelrad muss stets senkrecht zur Windrichtung stehen und ist folglich mit einer Windfahne zu koppeln oder als Handanemometer zu verwenden. Es funktioniert nach dem Prinzip einer Windmühle, ist sehr trägheitsarm, kann Schwankungen der Luftdichte, die in den mittleren Breiten etwa 10% ausmachen, weniger gut umsetzen. Flügelradanemometer werden im Winkanal geeicht und besitzen eine Messgenauigkeit von  $\pm 5\%$ .“ (Meteorologie – Brigitte Klose)

„Flügelradanemometer werden für Messungen in Gasen verwendet und bestehen aus einem offenen, kreiszylindrischen Gehäuse, in dem ein axiales Flügelrad, ähnlich dem eines Axiallüfters, angebracht ist. Mit dem Flügelradanemometer wird die Geschwindigkeitskomponente der Strömung, die parallel zur Geräteachse ist, bestimmt. Die in Umfangsrichtung wirkenden Strömungskräfte versetzen das Rad in Bewegung, die Drehfrequenz  $n$  des Rades wird gemessen. Theoretisch ist die Frequenz proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Da das Rad nicht reibungsfrei gelagert werden kann, ist der tatsächliche Zusammenhang nicht linear. Vom Hersteller werden Eichkurven oder Eich Tabellen geliefert. Es gibt Flügelradanemometer mit sehr kleinen Abmessungen (10mm Durchmesser); da sie jedoch die Strömung stören, eignen sie sich nur zur Geschwindigkeitsmessung in größeren Kanälen. Der hydrometrische Flügel (Abb. 12.17) arbeitet wie ein Flügelradanemometer. Er hat kein Gehäuse und wird zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten genommen. Diese Geräte sind gegenüber mechanischen Beanspruchungen und Verschmutzungen sehr empfindlich.“ (Fluidmechanik – Böckh, Saumweber)

## 6.5 Leistungsmessung

### 6.5.1 Hallensensor

„Der Hall-Effekt besagt: wird ein stromdurchflossenes Halbleiter-Plättchen (GaAs, InAs) senkrecht von einem Magnetfeld durchsetzt, dann werden die Ladungsträger aus ihrer waagerechten Bahn abgelenkt, womit an den Seitenflächen eine Hallspannung  $U_2$  auftritt, siehe Abbildung.

Beim unbelastetem Ausgang mit  $I_2=0$  erscheint die Leerlauf-Hallspannung  $U_{20}$  nach:

$$U_{20} = K_{B0} \cdot B \cdot I_1$$

Mit der Leelaufempfindlichkeit  $K_{B0}$  in  $V/(A \cdot T)$ , der magnetischen Induktion (Flussdichte)  $B$  in T (Tesla) und dem Eingangs-Steuerstrom  $I_1$  in mA. Hinweis: 1 Tesla=1T=1Vs/m<sup>2</sup>. Wirkt das Magnetfeld nicht senkrecht, sondern unter einem Winkel  $\alpha$ , dann gilt:

$$U_{20} = K_{B0} \cdot B \cdot I_1 \cdot \cos\alpha$$

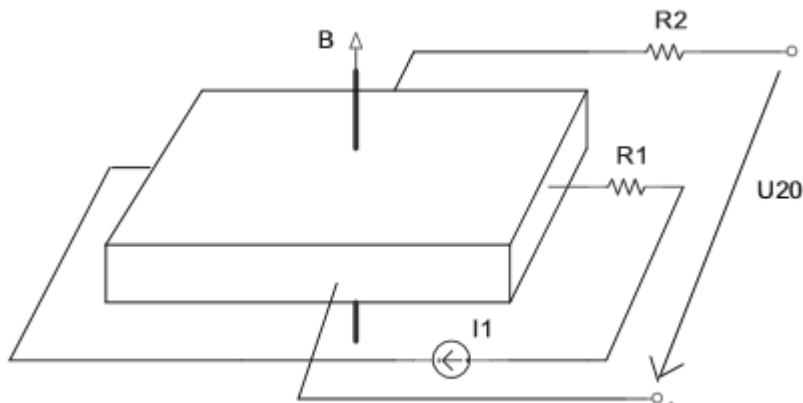


Abbildung 5: Prinzipielle Darstellung des Hallensors“ (Ausgewählte Sensorschaltungen – Baumann)

## Inhaltsverzeichnis

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsstand .....	3
Abbildung 2: Versuchsaufbau Durchflussmessung .....	9
Abbildung 3: Kennlinie eines Pt 100–Temperatursensors .....	19
Abbildung 4: Durchflussmessung mittels Ultraschall .....	25
Abbildung 5: Prinzipielle Darstellung des Hallsensors“ (Ausgewählte Sensorschaltungen – Baumann) .....	29

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezugswerte zur Kalibrierung .....	4
Tabelle 2: Ansprechzeiten .....	5
Tabelle 3: Endtemperaturen Reagenzgläser .....	6
Tabelle 4: Parameter für dem Messumformer .....	11
Tabelle 5: Geschwindigkeit in Anhängigkeit vom Drehwinkel .....	13
Tabelle 6: Thermoelemente nach DIN EN 60 584 .....	17