

# Komplexpraktikum Automatisierungstechnik

## Konzentrationsmessung

### 1. Zielstellung des Versuches

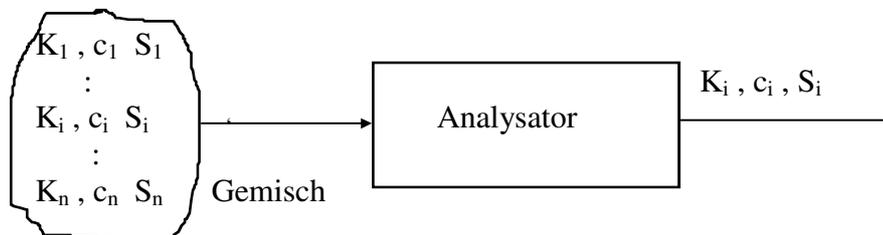
Ziele des Versuches sind das Kennen lernen von Verfahren zur Bestimmung der Konzentration einzelner Gase in einem Gasgemisch, von industriell relevanten selektiven und nichtselektiven Gassensoren und daraus aufgebauten Sensorsystemen sowie einer Gasmischeinrichtung.

### 2. Theoretische und experimentelle Grundlagen

Die analytische Messtechnik (*Analytik*) hat die Aufgabe, mit einem Analysator die

- *Qualität*  $K_i$  (Art),
- *Quantität*  $c_i$  (Konzentration) und/oder
- *Struktur*  $S_i$  (Form, Verteilung)

der  $i$ -ten Komponente eines Gemisches zu bestimmen.



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Messaufgabe

Der Analysator kann beispielsweise ein Sensor, ein Sensorsystem, ein Chromatograph oder ein Spektrometer sein.

Das Praktikum beschränkt sich auf die Analyse von Gasgemischen, die aus  $n$  Gasen bekannter Art  $K_i$  bestehen. Da Gasgemische keine Struktur  $S$  haben, sind nur die Konzentrationen  $c_i$  der  $n$  Gase relevant. Als Maß für die Konzentrationen  $c_i$  der als ideal betrachteten Gase werden

der *Partialdruck*  $p_i$  (Dalton'sches Gesetz:  $\sum_{i=1}^n p_i = p$ ) und

der *Volumenanteil*  $x_i = \frac{n_i}{n} = \frac{p_i}{p} = \frac{V_i}{V}$

benutzt. Dabei sind  $n_i$ ,  $n$  die Stoffmengen in mol und  $V_i$ ,  $V$  die Volumina der Gase und des Gemisches. Die Analyse von Gasgemischen wird mit Gassensoren durchgeführt.

## 2.1 Gassensoren

Gassensoren nutzen unterschiedliche physikalische, chemische oder biologische Verfahren zur Messgrößenwandlung. Diese lassen sich wie folgt einteilen:

- Verfahren mit energetischer Anregung des Gasgemisches
- Verfahren auf der Basis sensitiver Materialien
- Verfahren mit konstantem Energie- oder Molekülaustausch

### 2.1.1 Akustische Gassensoren

Akustische Gassensoren nutzen als Messeffekt den Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Zusammensetzung eines Gasgemisches. Das zu analysierende Gasgemisch (Messgas) wird Schallschwingungen ausgesetzt und die auftretende Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{mix}}$  wird gemessen. Für ein ideales Gasgemisch aus  $n$  Komponenten mit den Volumenanteilen  $x_i$  gilt

$$c_{\text{mix}} = c_{\text{mix}}(x_i, M_i, C_{p_i}, T) = \sqrt{\frac{RT}{\sum_{i=1}^n x_i M_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n x_i C_{p_i}}{\sum_{i=1}^n x_i C_{p_i} - R}} = \sqrt{\frac{\chi(x_i)}{M(x_i)} \cdot R \cdot T}$$

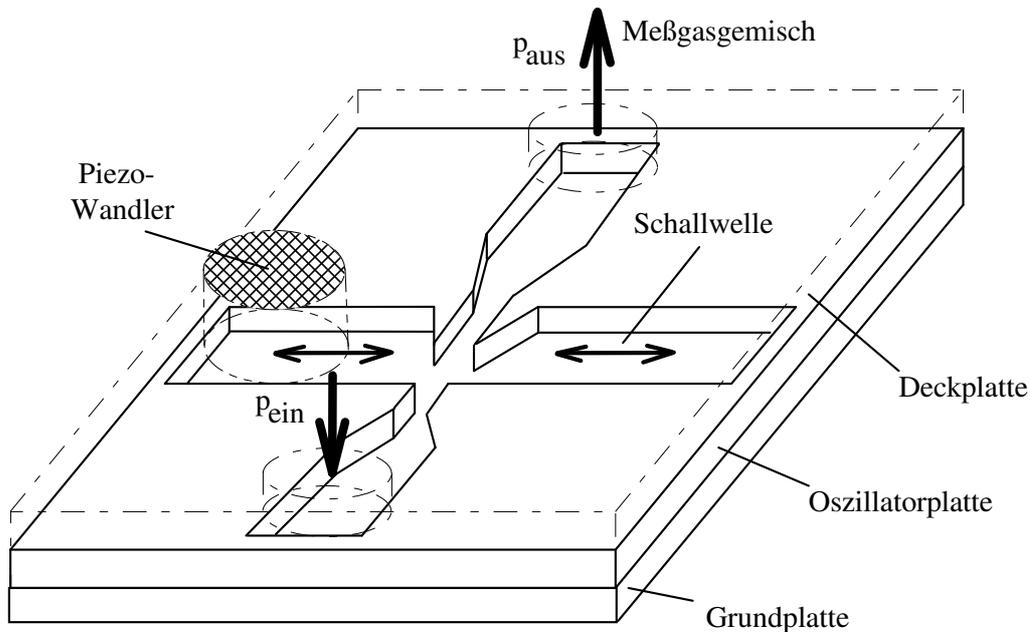
mit dem Adiabatenexponenten  $\kappa = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - R}$ .

Für binäre Gasgemische (aus nur zwei Komponenten bestehend) gilt:

$$c_{\text{mix}} = \sqrt{\frac{R T}{x_1 M_1 + (1 - x_1) M_2} \cdot \frac{x_1 C_{p1} + (1 - x_1) C_{p2}}{x_1 C_{p1} + (1 - x_1) C_{p2} - R}}$$

Die Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{mix}}$  hängt außer von der absoluten Temperatur  $T$ , den molaren Wärmekapazitäten  $C_{p_i}$  und  $C_{v_i}$  und den molaren Massen  $M_i$  auch von den Volumenanteilen  $x_i$  aller Komponenten des Messgases ab.  $R$  ist die allgemeine Gaskonstante. Die akustische Gasanalyse erfolgt nichtselektiv. Folglich sind aus der Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{mix}}$  lediglich die Anteile  $x_1$  und  $x_2$  eines binären Gemisches eindeutig bestimmbar.

Diesem Nachteil stehen wichtige Vorteile gegenüber. Schallwellen lassen sich in beliebigen Gasen bei beliebigen Temperaturen anregen. Die Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{mix}}$  ist eine zeitinvariante physikalische Größe. Wird sie zur primären Messgrößenwandlung genutzt, unterliegt sie im Gegensatz zu stoffgebundenen Wandlungseffekten (z.B. piezoelektrischer Effekt) keiner Alterung. Folglich ist eine akustische Gasanalyse auch dann noch möglich, wenn extreme Prozessbedingungen, wie Temperaturen  $> 100^\circ \text{C}$ , kontaminierte, aggressive oder explosive Messgasgemische vorliegen. Unter solch rauen Prozessbedingungen lässt sich die Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{mix}}$  zweckmäßig mit fluidisch-akustischen Oszillatoren messen.



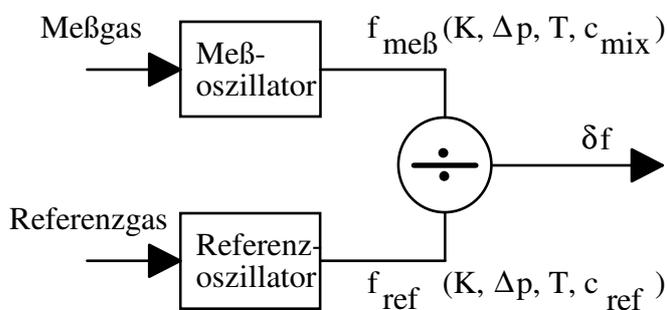
**Bild 2:** Fluidisch-akustischer Oszillator

Bei diesen Oszillatoren wird der Schall - ähnlich wie bei einer Orgelpfeife - fluidisch angeregt. Dabei sind mehrere strömungsmechanische und akustische Effekte wirksam. Das kann dazu führen, dass die Oszillatorfrequenz  $f$  auch von der die Oszillatoren betreibenden Druckdifferenz  $\Delta p = p_{\text{aus}} - p_{\text{ein}}$  abhängt, d.h.  $f = f(\Delta p, c_{\text{mix}}, K)$ . Bei konstanter Druckdifferenz  $\Delta p$  gilt

$f = K \cdot c_{\text{mix}}$ , wobei  $K$  die *Oszillatorkonstante* ist. Messfehler können entstehen, wenn die

Größen  $K$ ,  $\Delta p$  oder  $T$  schwanken.

Diese Störeinflüsse lassen sich kompensieren, wenn parallel zum *Messoszillator* ein *Referenzoszillator* eingesetzt wird. Für diese Kompensation werden im Messzustand der Messoszillator mit dem zu analysierenden Messgasgemisch und der Referenzoszillator mit einem bekannten Referenzgas (trockene Luft) betrieben.



**Bild 3:** Referenz-Messprinzip

Die Temperaturen von Mess- und Referenzgas werden mit einer thermisch gut leitenden Trennplatte so angeglichen, dass  $T_m = T_r$  gilt. Der Quotient der Frequenzen beider Oszillatoren ist dann

$$\delta f(x_i, K) = \frac{f_{\text{meß}}}{f_{\text{ref}}} = \frac{K_{\text{mess}}}{K_{\text{ref}}} \sqrt{\frac{M_{\text{ref}} \chi(x_i)}{M(x_i) \chi_{\text{ref}}}}$$

Die Oszillatorkonstanten  $K_{\text{mess}}$  und  $K_{\text{ref}}$  sollten gleich groß sein und sich aufheben. Jedoch können Fertigungstoleranzen oder Verschmutzungen geometrische Unsymmetrien bewirken, die zu ungleichen Werten  $K_{\text{mess}}$ ,  $K_{\text{ref}}$  und damit zu Nullpunktverschiebungen der Sensorkennlinie führen. Eine Nullpunktverschiebung wird korrigiert, indem Mess- und

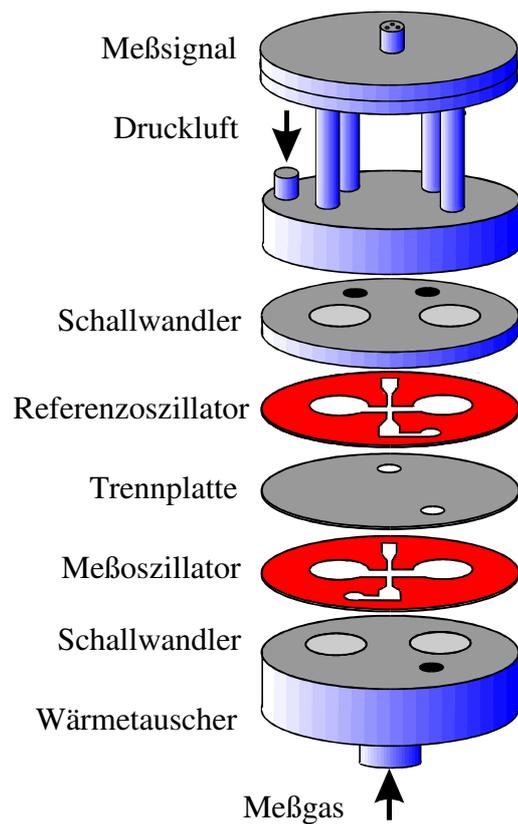
Referenzoszillator mit gleichem Gas betrieben werden. Beide Oszillatoren schwingen dann unter identischen Bedingungen. Im Idealfall ( $K_{\text{mess}} = K_{\text{ref}}$ ) wird der Sollquotient

$$\delta f_s = \frac{K_{\text{mess}}}{K_{\text{ref}}} = 1$$

gemessen. Er repräsentiert den idealen Nullpunkt des Sensors. In der Praxis gilt jedoch  $K_{\text{mess}} \neq K_{\text{ref}}$ . Folglich treten bei der Nullpunktkontrolle Istquotienten

$$\delta f_i = \frac{K_{\text{meß}}}{K_{\text{ref}}} = 1 + \frac{\Delta K}{K} = \delta f_s + \Delta(\delta f(K))$$

auf. Der Summand  $\Delta(\delta f(K)) < 1$  entspricht mit guter Näherung der Nullpunktverschiebung.



**Bild 4:** Aufbau eines akustischen Gassensors

### 2.1.2 Wärmeleitfähigkeits-Gassensoren

Wärmeübertragung kann durch Konvektion, Strahlung und/oder Leitung erfolgen.

Wärmeleitfähigkeits-Gassensoren nutzen die unterschiedlich starke Wärmeleitfähigkeit in Gasen als Messeffekt aus. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eines Körpers wird über die Beziehung

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{in W/mK}$$

definiert, wobei  $Q$  die Wärmemenge ist, die in der Zeit  $t$  durch die Fläche  $F$  mit einem Temperaturgefälle  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  fließt. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  für Gase ist im Bereich des

Normaldrucks vom Druck unabhängig. Sie ist aber temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur stark zu.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{mix}}$  von Gasgemischen hängt in komplizierter nichtlinearer Weise von den Volumenanteilen  $x_i$  der Komponenten ab. Für einige Gasgemische lässt sich die lineare Näherung

$$\lambda_{\text{mix}} = x_1 \lambda_1 + x_2 \lambda_2 + \dots$$

nutzen.

## Wärmeleitfähigkeitssensor CALDOS

In vier Gaskammern befinden sich Platin-Heizdrähte gleicher Dimensionierung. Durch die Drähte fließt ein gleichgroßer, konstanter Heizstrom  $I$ . Zwei der Kammern werden vom Messgas umspült, die anderen beiden ruhen im Referenzgas (Luft). Befindet sich zur *Nullpunktkontrolle* in allen vier Kammern das gleiche Gas, ist die Abkühlung und damit die Widerstandsänderung aller Heizdrähte gleich groß, und die Brücke ist im elektrischen Gleichgewicht ( $U_{\text{mess}} = 0$ ).

Im *Messfall* haben Mess- und Referenzgas unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda$ . Das führt zu einer unterschiedlichen Abkühlung der Heizdrähte und damit zu unterschiedlichen Widerstandswerten. Diese Widerstandsänderung verstimmt die Brücke und die Spannung  $U_{\text{mess}}$  ist proportional zur Differenz der Wärmeleitfähigkeiten von Mess- und Referenzgas. Aus der Spannung  $U_{\text{mess}}$  werden die Konzentrationen  $x_i$  der Gemischanteile ermittelt. Das gelingt nur bei *binären* Gasge-

mischen eindeutig und damit sind auch die Wärmeleitungssensoren *nichtselektiv*. Der Zusammenhang zwischen  $U_{\text{mess}}$  und den Konzentrationen  $x_i$  ist kompliziert und wird i.a. durch *Kalibrierung* hergestellt.

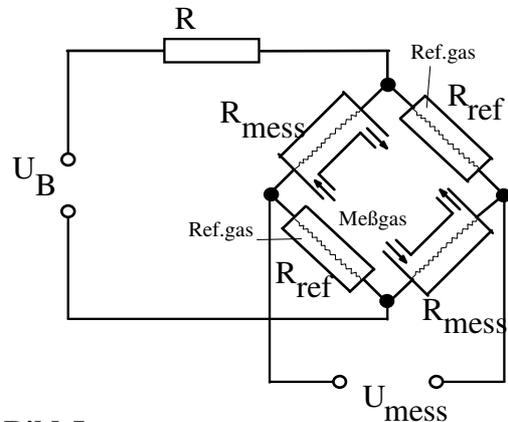
Bei Wärmeleitfähigkeits-Gassensoren können als Störgrößen Fremdgase, Temperaturschwankungen und Konvektion auftreten. Der Einfluss der Konvektion wird durch ein kleines Kammervolumen und durch Anordnung der Kammern im sogenannten Bypass zum Messgasstrom beseitigt bzw. in weiten Bereichen reduziert.

### 2.1.3 Festkörperelektrolyt-Gassensoren (Lambda-Sonde)

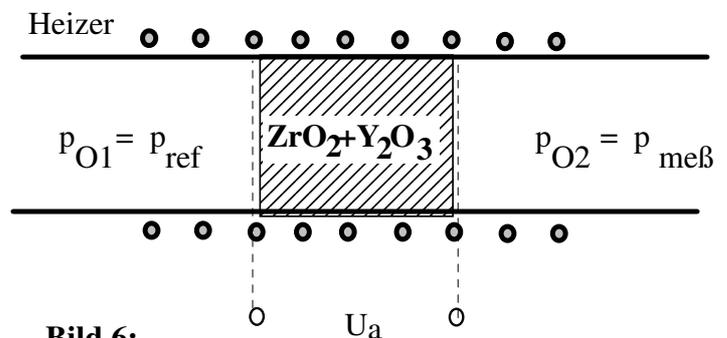
Festkörperelektrolyt Gassensoren nutzen zur Messgrößenwandlung elektrochemische Reaktionen. Bei Temperaturen  $\vartheta > 500^\circ\text{C}$  tritt bei bestimmten Verbindungen (z.B.  $\text{ZrO}_2$  mit  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) eine hohe Ionenleitfähigkeit ein. Diese führt zur Ausbildung einer Ladungsdoppelschicht an den Grenzflächen des Festkörperelektrolyten. Neutrale Sauerstoffatome aus einem Gas werden durch diese Ladungsdoppel-

schicht ionisiert und dann in den Festkörper eingebaut. Sind die Konzentrationen von Sauerstoff  $\text{O}_2$  zu beiden Seiten des Festkörperelektrolyten unterschiedlich groß, kommt es zur

Ausbildung einer Quellenspannung, die als Maß für den Konzentrationsunterschied des



**Bild 5 :**  
Prinzipschaltung des CALDOS



**Bild 6:**  
Lambda-Sonde

Sauerstoffs genutzt werden kann. Werden an beiden Seiten des Festkörperelektrolyten poröse Platin-Elektroden angebracht, kann die Quellenspannung als Ausgangsspannung  $U_a$  abgegriffen werden. Es gilt für Sauerstoff die **Nernstsche Gleichung**:

$$U_a = \frac{kT}{4|q|} \cdot \ln \frac{p_{\text{meß}}}{p_{\text{ref}}} = \frac{RT}{4F} \cdot \ln \frac{p_{\text{meß}}}{p_{\text{ref}}} = 0,0496 \text{ mV} \cdot \frac{T}{[K]} \cdot \lg \frac{p_{\text{meß}}}{p_{\text{ref}}}$$

k Boltzmann-Konstante      R allg. Gaskonstante      q Elementarladung  
T absolute Temperatur      F Faraday-Konstante

Wichtigstes Anwendungsbeispiel von Festkörperelektrolyten ist die  $\lambda$ -Sonde. Sie wird benutzt, um im Motorabgas den verbleibenden Sauerstoffgehalt zu bestimmen. Danach wird das Luft/Kraftstoff-Verhältnis so eingeregelt, dass

$$\lambda = \frac{\text{zugeführte Luftmenge}}{\text{theoretischer Luftbedarf}} \implies 1$$

erreicht wird. Die  $\lambda$ -Sonde arbeitet spezifisch bezüglich Sauerstoff, d.h. die Anteile Sauerstoff  $x_{O_2}$  sind in jedem n-wertigen Gasgemisch eindeutig bestimmbar.

## 2.2 Gasmischung mit Gasmischeinrichtung

Die im Praktikum zu analysierenden Messgasgemische werden mit einer Gasmischeinrichtung SM 4000 hergestellt. Als Gase stehen in Druckflaschen zur Verfügung: **He, Ar und Luft**.

### Gasmischeinrichtung SM 4000 mit Flussregler

Die Gasmischeinrichtung besteht aus dem Steuergerät SM 4000 und Gasflussreglern GFR (Volumenstromregler). Die GFR messen den Ist-Gasvolumenstrom  $\dot{V}_i = \Delta V / \Delta t$  und stellen ihn auf den gewünschten Sollwert  $\dot{V}_s$  ein. Dazu liefert der GFR eine, dem Istwert  $\dot{V}_i$  proportionale Spannung 0 ... 5 V an das Steuergerät und empfängt von diesem ebenfalls in Form eines analogen Spannungssignals den einzustellenden Sollwert  $\dot{V}_s$ .

Der Ist-Volumenstrom  $\dot{V}_i$  wird im GFR thermisch gemessen. In einem kleinen Röhrchen sind drei Heizelemente hintereinander angeordnet. Das strömende Gas beeinflusst die Temperaturverteilung (Konvektion). Es werden die Heizleistungen gemessen, die bei fließendem Gas die Temperaturverteilung konstant hält. Diese sind ein (lineares) Maß für den Gasvolumenstrom. Die GFR wurden vom Hersteller für Stickstoff unter Normalbedingungen kalibriert. Sobald sich der  $c_p$ -Wert und die Dichte des Messgases  $\rho$  ändern, muss das Ausgangssignal der Messeinrichtung mit einem Faktor korrigiert werden. Bei richtiger Einstellung des Steuergerätes (Gasart) ist der Faktor automatisch berücksichtigt. Das Messgasgemisch besteht aus dem Füllgas Luft und den oben genannten Messgasen. Die Konzentrationen der Messgase sollen durch Volumenanteile  $x_i$  gekennzeichnet werden. Beispielsweise gilt für ein binäres Messgasgemisch:

$$x_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2} = \frac{V_1}{V} \quad \text{mit } V_1 + V_2 = V \quad \text{sowie } x_1 + x_2 = 1$$

### 3. Versuchsvorbereitung (vor Versuchsbeginn zu lösende Aufgaben)

3.1 Was sind *spezifische* und *nichtselektive* Gassensoren?

3.2 Ein fluidisch-akustischer Oszillator wird mit Luft gespeist und schwingt mit 2,5 kHz. Die Schallgeschwindigkeit in dieser Luft wird mit  $c = 400 \text{ ms}^{-1}$  gemessen.

- Welche absolute Temperatur T hat die Luft?
- Wie groß ist die Oszillatorkonstante?

Hinweis:  $R = 8,314 \text{ kJ}/(\text{kmol K})$ ,  $M_{\text{Luft}} = 28,97 \text{ kg}/\text{kmol}$ ,  $\kappa_{\text{Luft}} = 1,4$

3.3 Erklären Sie das Referenzprinzip mit dem Quotientenverfahren!

3.4 Welchen Effekt erreicht man, wenn in einer Brückenschaltung (wie beim Wärmeleitfähigkeits-Sensor CALDOS) gegenüberliegende Zweige gleich beeinflusst werden?

3.5 Bereiten Sie folgende Tabelle zur Gasmischung vor (binäres Gasgemisch): Argon - Luft, Gesamtgasfluss 5 l/min, Schrittweite 0,5 l/min.

Beachten Sie die Normierungsbedingungen:

$$\dot{V}_{\text{Luft}} + \dot{V}_{\text{Ar}} = 5 \text{ l/min} \quad x_{\text{Luft}} + x_{\text{Ar}} = 1$$

$\dot{V}_{\text{Luft}}$ [l/min]	$x_{\text{Luft}}$	$\dot{V}_{\text{Ar}}$ [l/min]	$x_{\text{Ar}}$
5,0	1	0	0
4,5	0,9	0,5	0,1
...	...	...	...

## 4. Aufgabenstellung für die Versuchsdurchführung

### 4.1 Hinweise

Achten Sie mit darauf, dass die Heizung der Lambda-Sonde mindestens **30 min.** vor Beginn des Versuchspunktes 4.4 eingeschaltet wird!

Im Praktikum werden industrielle Laborgeräte eingesetzt. Eine Kurzerklärung der Bedienelemente dieser Geräte liegt am Arbeitsplatz.

Zur Gasmischung: Die Gase sind den Kanälen wie folgt fest zugeordnet:

Kanal 1:	-	
Kanal 2:	Luft	max. 10 l/min
Kanal 3:	Argon	max. 5 l/min
Kanal 4:	Helium	max. 1 l/min (jeweils bezogen auf N <sub>2</sub> )

Der **Wärmeleitfähigkeits-Sensor** benötigt einen Gasvolumenstrom von **1 l/min.**

$$\begin{aligned} \text{Beispiele: } x_{\text{Luft}} = 1,0 + x_{\text{Ar}} = 0 & \implies \dot{V}_{\text{Luft}} = 1,0 \text{ l/min} + \dot{V}_{\text{Ar}} = 0 \text{ l/min} \\ x_{\text{Luft}} = 0,7 + x_{\text{Ar}} = 0,3 & \implies \dot{V}_{\text{Luft}} = 0,7 \text{ l/min} + \dot{V}_{\text{Ar}} = 0,3 \text{ l/min} \end{aligned}$$

Der **akustische Sensor** benötigt einen Gasvolumenstrom von **> 4,5 l/min.** Mit dem Gasdosiergerät sollen immer **5 l/min** bereitgestellt werden. Der Gasüberschuss strömt über ein T-Stück am Sensoreingang ab.

$$\begin{aligned} \text{Beispiele: } x_{\text{Luft}} = 1,0 + x_{\text{Ar}} = 0 & \implies \overset{*}{V}_{\text{Luft}} = 5,0 \text{ l/min} + \overset{*}{V}_{\text{Ar}} = 0 \text{ l/min} \\ x_{\text{Luft}} = 0,7 + x_{\text{Ar}} = 0,3 & \implies \overset{*}{V}_{\text{Luft}} = 3,5 \text{ l/min} + \overset{*}{V}_{\text{Ar}} = 1,5 \text{ l/min} \end{aligned}$$

Die **Lambda-Sonde** benötigt einen Gasvolumenstrom von ca. **1 l/min.**



Schließen Sie die Gasdosiereinrichtung (Enable → deaktiviert) bei den Messungen mit dem akustischen Sensor aufgrund des relativ hohen Gasdurchflusses auch zwischen den Einstellvorgängen und nach Beendigung des jeweiligen Experimentes!

## 4.2 Gaskonzentrations-Messung mit akustischen Binärgassensor

### 4.2.1 Versuchsanordnung

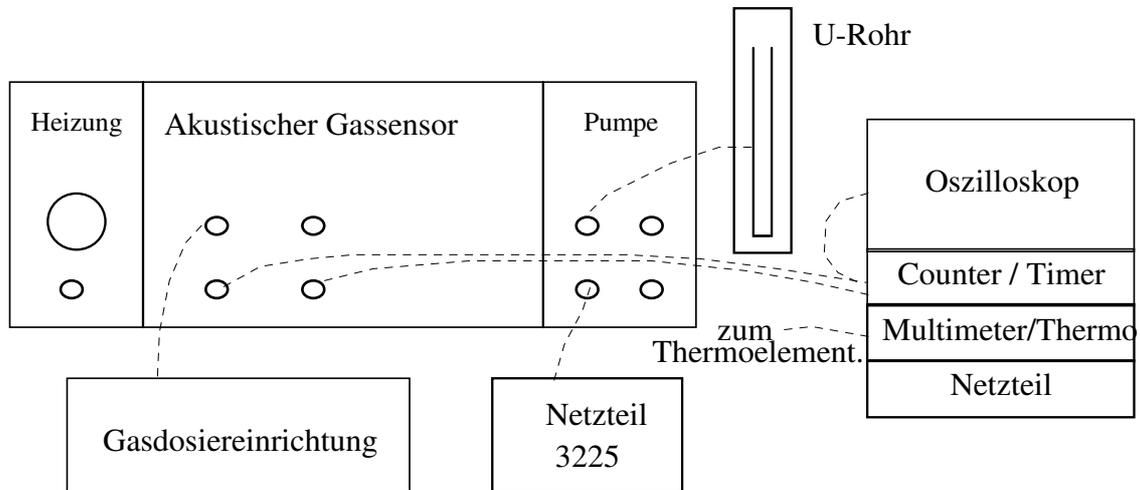
Das mittels Gasdosiereinrichtung erzeugte Messgasgemisch wird temperiert und dem akustischen Sensor zugeführt. Der „Antrieb“ des Sensors erfolgt mit Druckluft. Der Betriebsdruck wird mit U-Rohr-Manometer angezeigt. Zur Anzeige der Sensorsignale stehen ein Oszillograph und ein Zähler (Counter/ Timer) zur Verfügung (s. Bild nächste Seite).

Für diesen Versuch sind die Geräte nach Bild bereits aufgebaut und angeschlossen. Überzeugen Sie sich von der Richtigkeit und Vollständigkeit der Verbindungen.

Schalten Sie die elektrischen Mess- und Netzgeräte und öffnen Sie die Druckluftzufuhr. Stellen Sie den Betriebsdruck des Sensors auf 220 mmWS ein. Messen Sie die Temperatur mit dem eingebauten Thermoelement am Multimeter.



Die Sensorheizung vorerst nicht einschalten! Netzstecker ist gezogen!



#### 4.2.2 Bestimmung der Oszillatorkonstanten

Bestimmen Sie die Oszillatorkonstante des Messoszillators über die Beziehung

$$f = K \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{M} \cdot R \cdot T}$$

Benutzen Sie als Messgas unbedingt Umgebungsluft. Diese wird automatisch vom Sensor angesaugt, wenn die Gasdosiereinrichtung geschlossen ist.

Hinweis:  $R = 8,314 \text{ kJ}/(\text{kmol K})$ ,  $M_{\text{Luft}} = 28,97 \text{ kg}/\text{kmol}$ ,  $\kappa_{\text{Luft}} = 1,4$ .

#### 4.2.3 Experimentelles Bestimmen der Kalibrierfunktion

Bestimmen Sie punktweise die Kalibrierfunktion des akustischen Sensors (Messoszillator) für das binäre Messgasgemisch **Argon - Luft für  $x_{\text{Ar}} = 0 \dots 1$  in Schritten von 0,1.**

Nutzen Sie für die Versuchsdurchführung die vorbereitete Tabelle aus 3.5!

Stellen Sie das Ergebnis als  $f = f(x_{\text{Ar}})$  grafisch dar und diskutieren Sie das Ergebnis.

#### 4.2.4 Einfluss von Fremdgas

Weisen Sie die Nichtselektivität des akustischen Sensors nach. Benutzen Sie dazu das ternäre Gasgemisch **Helium-Argon-Luft mit  $x_{\text{He}} = 0,1$ ;  $x_{\text{Ar}} = 0,2$ ;  $x_{\text{Luft}} = 0,7$ .**

Diskutieren Sie das Ergebnis durch Vergleich mit den Messwerten aus Aufgabe 4.2.3.



### 4.3.2 Versuchsablauf

Verbinden Sie mit dem vorgesehenen Schlauch den Ausgang des Gasdosiergerätes mit dem Sensoreingang „Messgas Eing.“ (benötigter Gas-Volumenstrom **1 l/min**).

Speisen Sie aus dem Netzteil die Messbrücke mit einem konstanten Strom von **200 mA**.

Messen Sie die Brückenspannung  $U_{\text{mess}}$  mit dem Multimeter (Miniaturbuchsen).

Machen Sie sich das Wirkprinzip des Sensors anhand des offenen Messkopfes klar.

### 4.3.3 Experimentelle Bestimmung der Kalibrierfunktion

Bestimmen Sie die Kalibrierfunktion des Wärmeleitfähigkeits-Sensors für das binäre Messgasgemisch **Argon-Luft für  $x_{\text{Ar}} = 0 \dots 1$  in Schritten von 0,1**.

Stellen Sie das Ergebnis als  $U_{\text{mess}} = U_{\text{mess}}(x_{\text{Ar}})$  grafisch dar.

### 4.3.4 Einfluss von Fremddgas

Weisen Sie die Nichtselektivität des Wärmeleitfähigkeits-Sensors nach. Benutzen Sie dazu das ternäre Gasgemisch **Helium-Argon-Luft mit  $x_{\text{He}} = 0,2$ ;  $x_{\text{Ar}} = 0,2$ ;  $x_{\text{Luft}} = 0,6$** .

Diskutieren Sie das Ergebnis durch Vergleich mit den Messwerten aus Aufgabe

### 4.3.5 Temperaturabhängigkeit

Stellen Sie ein Messgasgemisch **Helium-Luft mit  $x_{\text{He}} = 0,2$ ;  $x_{\text{Luft}} = 0,8$** ;

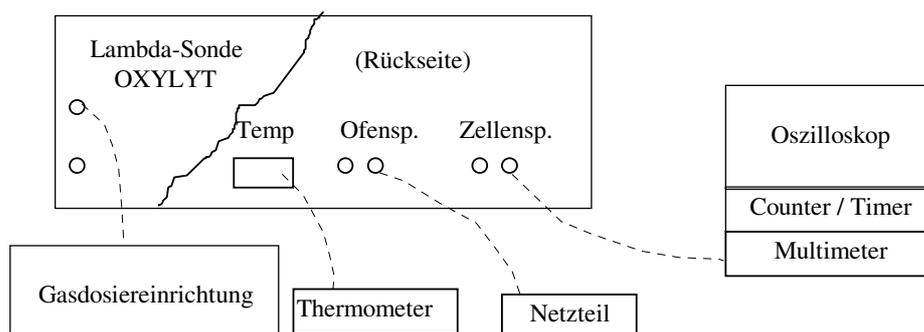
Erwärmen Sie den Sensor mit dem Fön, einmal im gekapselten (mit Deckel) und anschließend offenen Zustand und beobachten Sie die Brückenspannung.

## 4.4 Gaskonzentrations-Messungen mit Lambda-Sonde

### 4.4.1 Versuchsanordnung

Das mittels Gasdosiereinrichtung erzeugte Messgasgemisch der Lambda-Sonde zugeführt.

Die Sonde wird in einem kleinen Ofen geheizt. Die Ofentemperatur muss vor Beginn der Experimente **> 500°C** sein! Die Messung der Zellenspannung erfolgt mittels Multimeter.



### 4.4.2 Versuchsablauf

Verbinden Sie mit dem vorgesehenen Schlauch den Ausgang des Gasdosiergerätes mit dem Sensoreingang „Gas-Eintritt“.

Messen Sie mit dem elektronischen Thermometer die Ofentemperatur.

Messen Sie mittels Multimeter die Zellenspannung.

#### 4.4.3 Experimentelle Bestimmung der Kalibrierfunktion

Bestimmen Sie die Kalibrierfunktion der Lambda-Sonde für das binäre Messgasgemisch

*Argon - Luft für  $x_{Ar} = 0 \dots 1$  in Schritten von 0,2.*

Nutzen Sie für die Versuchsdurchführung die vorbereitete Tabelle aus 3.5!

Erläutern Sie das Ergebnis anhand der Nernstschen Gleichung.

#### 4.4.4. Einfluss von Fremdgas

Legen Sie an den Messgaseintritt *Helium-Argon-Luft mit  $x_{He} = 0,2$ ;  $x_{Ar} = 0,2$ ;  $x_{Luft} = 0,6$*  an und messen Sie die Zellenspannung nach Abklingen der Einschwingvorgänge. Diskutieren sie das Messergebnis bezüglich der Ergebnisse aus 4.4.3. Verhält sich die Sonde spezifisch?

#### 4.4.5 Untersuchung der Temperaturabhängigkeit

Schalten Sie die Ofenheizung jetzt aus und legen Sie an den Messgaseintritt reines Argon  $x_{Ar} = 1,0$  an. Messen Sie bei abkühlendem Ofen alle 50 °C bis ca. 400°C die Zellenspannung. Interpretieren Sie das Ergebnis!

## 5. Literatur

- [1] Profos, P.; Pfeifer, T.:  
Handbuch der industriellen Messtechnik  
R. Oldenbourg Verlag
- [2] Tränkler, H.-R.:  
Taschenbuch der Messtechnik  
R. Oldenbourg Verlag, München
- [3] Schnell, G.:  
Sensoren in der Automatisierungstechnik  
Vieweg-Verlag, Wiesbaden
- [4] Schaumburg, H.:  
Sensoren  
Teubner, Stuttgart

Erarbeitet: Prof. Dr.-Ing. habil. L. Zipser, Dr.-Ing. R. Pilz  
Überarbeitet: Dipl.-Ing. L. Benke, Januar 1999  
Überarbeitet: Dipl.-Ing. (FH) W.-D. Bretschneider, Februar 2016