

## Trägheitslose Messung von Temperatur, Massen- und Volumenfluß in Gasen durch Ultraschall

Barth, H.-J.; Jeschke, D.

*Die Schallgeschwindigkeit ist eine charakteristische physikalische Stoffgröße. In Gasen läßt die Schallgeschwindigkeit Rückschlüsse auf die Temperatur zu. In Kombination mit einem Druckaufnehmer läßt sich eine Meßanordnung aufbauen, die kontinuierlich und trägheitslos Temperatur, Volumen- und Massenstrom bestimmt. Dem Benutzer sind so die wichtigsten thermodynamischen Zustandsgrößen des Gases zugänglich.*

*The sound velocity is a physical value for any kind of material. Especially in gases the sound velocity will allow to make conclusions about the temperature. In combination with a manometer it is possible to measure temperature, volume flow rate and mass flow rate continuously and without time lag.*

### 1. Einleitung

Die meßtechnische Erfassung dynamischen Gasverhaltens erfordert eine schnelle Meßwerterfassung von zwei der drei Größen aus der allgemeinen Gasgleichung:

$$pv = RT$$

Die Gesamtdauer gasdynamischer Änderungsvorgänge liegt im Millisekundenbereich. Eine geeignete Meßwerterfassung muß in der Lage sein, mit einer deutlich niedrigeren Ansprechzeit zu arbeiten. Die Druckmessung bereitet in dieser Hinsicht keinerlei Probleme. Hier werden Antwortzeiten bis zu 0,1ms erreicht /1/. Das spezifische Volumen und das absolute Volumen lassen sich zwar zuverlässig bestimmen, aber nicht mit der erforderlichen Genauigkeit und Geschwindigkeit.

Damit bleibt eine Lösung des Problems der Temperaturmessung überlassen. Hierfür wird üblicherweise ein Referenzkörper oder eine Referenzflüssigkeit auf

die Temperatur des zu messenden Objektes gebracht. Durch die Ausdehnung kann dann anhand einer Eichkurve die Temperatur abgelesen werden. Nachteilig ist die Trägheit solcher Systeme, die trotz einer Minimierung der Referenzmasse im Sekundenbereich liegt.

Eine Verbesserung wird durch den Einsatz von sogenannten Thermoelementen erreicht. Hier wird durch die Temperatur eine Spannung an einer Lötstelle mit zwei unterschiedlichen Materialien verursacht. Der Einsatz von 0,045mm dicken Sensordrähten ergibt eine Antwortzeit von 35ms /2/.

Im folgenden soll der Ansatz einer Temperaturmessung über die Schallgeschwindigkeit weiter verfolgt werden und zu einer Volumen- und Massenflußmessung ausgebaut werden.

### 2. Theorie

#### 2.1 Temperaturbestimmung

Die Schallgeschwindigkeit hängt bei idealen Gasen nur von der Temperatur ab.

$$a = \sqrt{\kappa RT}$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Um die Ergebnisse allgemeiner verwenden zu können, wird die Herleitung für vollkommene Gase gemacht /3/. Das bedeutet **konstante spezifische Wärme**. Luft als Arbeitsmedium der Pneumatik erfüllt diese Voraussetzungen.

Die Umformung des **1. Hauptsatzes der Thermodynamik für einen stationär durchströmten Kontrollraum** führt zu dem sogenannten Energiesatz von Bernoulli:

$$c dc + \frac{dp}{\rho} = 0$$

$$\frac{c^2}{2} + \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} = 0$$

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[ \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

$$\Rightarrow c^2 = \frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

Der Werte  $c$  entspricht der Strömungsgeschwindigkeit des Fluides.

Die Schallgeschwindigkeit, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer **kleinen** Störung im Gas, ist definiert durch:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\partial \rho(p, S)}{\partial p} \rightarrow a^2 = \left( \frac{dp}{d\rho} \right)_{S=const.} = \kappa \frac{p}{\rho}$$

Unter der Bedingung einer isentropischen Zustandsänderung ergibt folgenden Zusammenhang zwischen Druck, spez. Dichte und Temperatur:

$$\frac{p}{p_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\kappa = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

Damit errechnet sich die Schallgeschwindigkeit aus folgendem Zusammenhang:

$$\kappa \frac{p_0}{\rho_0} - \frac{\kappa-1}{2} c^2 = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$a^2 = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} - \frac{\kappa-1}{2} c^2$$

Dieser Ausdruck, der die Schallgeschwindigkeit beschreibt, wird nun in die Bernoullische Gleichung eingesetzt.

Die Verwendung der allgemeinen Gasgleichung ersetzt Druck und spez. Dichte durch die Temperatur und ergibt eine Gleichung, bei der nur noch die Schallgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit des Fluids als Meßgrößen vorkommen. Die Gaskonstante und Kappa sind feste Größen, die nicht von Druck oder Dichte abhängen. Die geforderte Meßgröße **Temperatur** läßt sich jetzt mit folgender Formel berechnen:

$$T = \frac{a^2}{\kappa R} + \frac{\kappa-1}{2\kappa R} c^2$$

Für Luft als Einsatzmedium ergeben sich folgende Werte für die Konstanten:

$$\kappa = 1,405$$

$$R = 287,1 \frac{m^2}{s^2 K}$$

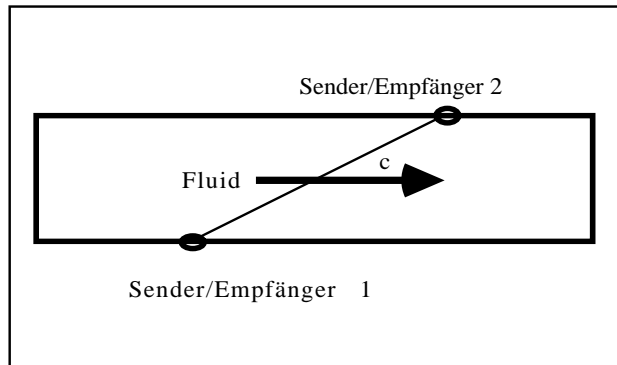
## 2.2 Bestimmung des Massenflusses

Die Bestimmung der Temperatur in einem Fluid über die Schallgeschwindigkeit erfordert die gleichzeitige Ermittlung der Fluidgeschwindigkeit. Wenn jetzt noch parallel dazu der Druck im Fluid gemessen wird, kann man aus der allgemeinen Gasgleichung sowohl den Volumenfluß als auch den Massenfluß berechnen.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= Ac \\ p v &= RT \\ p &= \rho RT \\ \rho &= \frac{p}{RT} \\ \dot{m} &= \frac{pAc}{RT} \end{aligned}$$

### 3. Meßanordnung

Die Messung der Schallgeschwindigkeit erfolgt in einer schräg zur Fließrichtung des Mediums angebrachten Anordnung der Ultraschallsender/-empfänger (**Bild 3.1**).



**Bild 3.1** Meßanordnung für die Temperaturmessung

Der Vorteil dieser Meßanordnung liegt darin, daß Schallgeschwindigkeit und Geschwindigkeit des Fluides durch die gleiche Messeinrichtung bestimmt werden können. Durch einen Vergleich der beiden Laufzeiten ist es auch möglich, die Fließrichtung des Mediums zu bestimmen.

In einem Meßumformer werden dann die Laufzeiten, einmal in Fließrichtung und einmal gegen die Fließrichtung, verwendet, um Schallgeschwindigkeit und Fluidgeschwindigkeit zu berechnen. Zusätzlich wird der Meßwert des Druckaufnehmers verwendet, um den Volumenstrom bzw. den Massenstrom zu ermitteln.

Am Institut für Maschinenwesen entsteht zur Zeit eine Meßstrecke nach obigem Meßprinzip. Dazu wurde ein geeignetes Ultraschallmeßgerät beschafft und modifiziert, so daß jetzt die Fluidgeschwindigkeit und die Schallgeschwindigkeit synchron ausgegeben werden. Zusätzlich wurde in die Prüfstrecke eine Druckmeßdose eingebaut. Zur Kontrolle ist ein Pt100-Thermoelement eingesetzt worden, mit dem auch die Eichung durchgeführt wird. Die Meßwerte für Schallgeschwindigkeit, Fluidgeschwindigkeit, Druck und

Temperatur werden an eine Meßwerterfassungskarte übermittelt und dort aufbereitet. Aus den Laufzeiten des Ultraschallsignals werden die Schallgeschwindigkeit und die Fluidgeschwindigkeit ermittelt. Mit diesen Ergebnissen lassen sich dann die Temperatur und, unter Einbeziehung des Druckwertes, der Massenstrom berechnen.

Das Meßgas ist normale Druckluft. Sie kann in einem geschlossenen Rohrsystem gefahren werden. Umwälzgeschwindigkeit und Temperatur können, in einem bestimmten Rahmen, variiert werden. In einer anderen Anordnung expandiert die Druckluft über einen Druckminderer und das Meßgerät ins Freie. Zur Eichung des Gerätes und zur Ermittlung der Eckdaten werden sich die ersten Versuch auf stationäre Zustände beschränken und durch das Pt100-Thermoelement kontrolliert. Nach diesen vorbereitenden Maßnahmen werden dann dynamische Vorgänge gemessen. Im einzelnen bieten sich an:

- Druckminderer im Lastwechsel
- Öffnungsvorgänge bei Ventilen
- Aufprägen gezielter Störungen in einem Druckluftsystem
- Druckluftzylinder
- etc.

### 4. Zusammenfassung

Sowohl die theoretische Herleitung als auch erste Versuche deuten darauf hin, daß es möglich ist, sowohl die Temperatur als auch den Massenfluß von Fluiden auf die oben geschilderte Art und Weise zu messen. Der Meßvorgang bewegt sich im Mikrosekundenbereich und läßt hoffen, daß dynamische Vorgänge in der Pneumatik, wie zum Beispiel der Öffnungsvorgang eines Ventils, vollständig gemessen

werden kann.

Das angestrebte Meßverfahren bietet im Vergleich zu anderen Verfahren zur Temperatur- bzw. Massenstrommessung folgende Vorteile:

- keine Rückwirkungen auf das Fluid,
- gleichzeitige Messung von Schall- und Fluidgeschwindigkeit,
- trägheitslose Massenstrom- und Temperaturmessung
- weite Temperaturbereiche erfaßbar

In Kombination mit einer Druckmessung läßt sich dann eine vollständige Beschreibung des Gaszustandes in einem bestimmten Bereich machen. Diese Beschreibung beinhaltet Temperatur, Druck, Geschwin-

digkeit und sich daraus ergebende Größen wie Massenfluß und Dichte. Die Genauigkeit der dynamischen Messung hängt wesentlich von der Laufzeitmessung ab, die jedoch in einem schon industriell genutzten Bereich bleibt.

## 5. Literatur

- /1/ Strohmann, G.: atp-Marktanalyse, Druckmeßtechnik. atp 6/93, 7/93, 8/93
- /2/ Philips: Firmenbroschüre
- /3/ Sauer, R.: Einführung in die theoretische Gasdynamik. Springer Verlag: Berlin, Göttingen, Heidelberg: 1960