

**Grundlagen**  
**der**  
**DURCHFLUSSMESSUNG**  
**mittels**  
**Heißfilmanemometer**

## Inhaltsverzeichnis:

### 1. Definitionen

- 1.1. Luftgeschwindigkeit
- 1.2. Gasmenge
- 1.3. Durchfluss
  - 1.3.1. Massendurchfluss (Massenstrom)
  - 1.3.2. Volumendurchfluss
  - 1.3.3. Norm-Volumendurchfluss

### 2. Berechnung des Durchflusses

### 3. Durchflussmessung mittels E+E Heißfilmanemometer

## 1. Definitionen:

### 1.1. Luftgeschwindigkeit:

#### **Definition:**

„Luftgeschwindigkeit ist die Distanz die ein Luftmolekül in einer bestimmten Zeit zurücklegt“

#### **Einheiten:**

Name der Einheit	Abkürzung	Gewandelt in SI-Einheit m/s
Meter pro Sekunde	m/s	1 m/s
Kilometer pro Stunde	km/h	0,277778 m/s
Zentimeter pro Minute	cm/min	$1,666667 \cdot 10^{-4}$ m/s
Zentimeter pro Sekunde	cm/s	$1 \cdot 10^{-2}$ m/s
Meter pro Minute	m/min	$1,66667 \cdot 10^{-2}$ m/s
Millimeter pro Minute	mm/min	$1,666667 \cdot 10^{-5}$ m/s
Millimeter pro Sekunde	mm/s	$1 \cdot 10^{-3}$ m/s
Foot per hour	ft/h, fph	$8,466667 \cdot 10^{-5}$ m/s
Foot per minute	ft/min, fpm	$5,08 \cdot 10^{-3}$ m/s
Foot per second	ft/s, fps	0,3048 m/s
Furlong per fortnight	furlong/fortnight	$1,66309 \cdot 10^{-4}$ m/s
Inch per second	in/s, ips	$2,54000 \cdot 10^{-2}$ m/s
Knoten	kn, knot	0,514444 m/s
Kyne	cm/s	$1 \cdot 10^{-2}$ m/s
Meile pro Jahr	mpy	$8,04327 \cdot 10^{-13}$ m/s
Meile (stat) pro Stunde	mph, mi/h	0,44704 m/s
Meile (stat) pro Minute	mi/min	26,8224 m/s

## 1.2. Gasmenge:

Unter einer Gasmenge „ $n$ “ versteht man eine Anzahl von Gasteilchen (Moleküle). Die Gasmenge  $n$  wird in *mol* angegeben. ( $1\text{ mol} = 6.023 \cdot 10^{23}$  Teilchen).

Zum besseren Verständnis und einfachen mathematischen Beschreibung wird das Verhalten von Gasen mittels eines idealisierten Modells, dem so genannten „idealen Gas“ beschrieben:

Für ein so genanntes ideales Gas ist die Gasmenge definiert durch die allgemeine Gasgleichung:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

mit der allgemeinen Gaskonstante  $R = 8.3145 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$ .

Volumen  $V$ , Druck  $p$  und Temperatur  $T$  nennt man Zustandsgrößen. Sie definieren den Zustand der Menge  $n$ .

Kennt man die Zusammensetzung des Gases so kann man die Gasmenge  $n$  durch sein Gewicht bzw. seine Masse „ $m$ “ beschreiben.

Eingesetzt in die ideale Gasgleichung:

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

mit  $R_i$  als individuelle Gaskonstante. Sie variiert je nach der Zusammensetzung der Gase:

Gas	Luft	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
indiv. Gaskonstante $R_i$	287	259,8	296,8	4124	188,9

Eine Menge kann also auf zwei verschiedene Weisen ermittelt werden:

1. Man wiegt die Menge z.B. auf einer Waage, das heißt man bestimmt die Masse der betrachteten Menge. Kennt man die Masse eines Moleküles, kann man auch die Anzahl der Moleküle ermitteln.

**Masse** gemessen in *kg* oder *g*

2. Man bestimmt den Zustand der Menge:  
Man misst das Volumen  $V$ . Mittels der Temperatur  $T$  und dem Druck  $p$  kann über die ideale Gasgleichung die Menge berechnet werden.

**Volumen** gemessen in  $m^3$ ,  $dm^3$  oder  $cm^3$

Das Verhältnis dieser beiden Größen bestimmt die Dichte  $\rho$ .

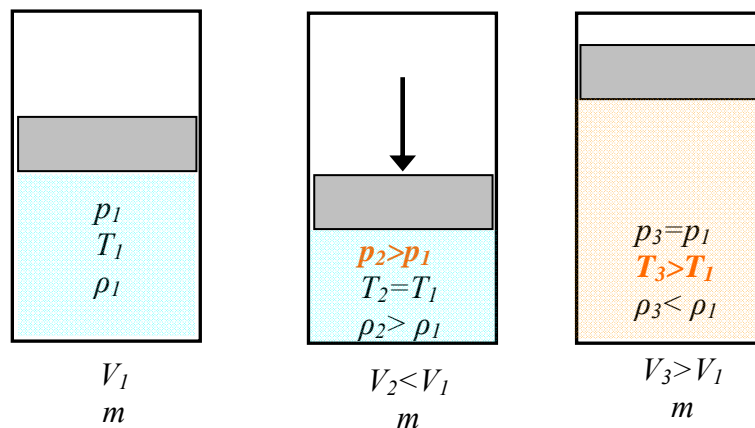
$$\text{Dichte } \rho = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}} = \frac{m}{V} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

## Grundlagen Durchflussmessung

Sie ist eine Kenngröße für den Zustand des Mediums und ist durch die individuelle Gaskonstante, der Temperatur und dem Druck des Mediums gegeben.

$$\rho = \frac{p}{R_i \cdot T}$$

Die Dichte  $\rho$  des Gases ist also linear abhängig vom Druck  $p$  und seiner Temperatur  $T$ . Sehr anschaulich kann der Zusammenhang dieser Größen durch einen Zylinder veranschaulicht werden, der vom einem beweglichen Kolben nach oben begrenzt ist.



Das System wird als vollkommen dicht angenommen. Das bedeutet, die Menge, und damit die Masse bleibt konstant.

Wird der Druck im Zylinder erhöht, in dem ich den Kolben mit einer Kraft nach unten gedrückt wird ( $p_2 > p_1$ ), verdichtet sich das Gas, und das Volumen des Gases wird kleiner. Andererseits, erwärme ich die Luft im Zylinder ( $T_3 > T_1$ ), so wird die Dichte geringer, das Volumen des Gases wird größer.

### Zusammengefasst:

Die Masse eines Gases mit bekannter Zusammensetzung ist direkt ein Maß für die Gasmenge. Das Volumen eines Gases definiert nur in Zusammenhang mit der Temperatur und dem Druck die Gasmenge, ist jedoch unabhängig von der Gaszusammensetzung!

Um trotzdem eine Temperatur- und druckunabhängige Volumengröße zu erhalten, rechnet man das zur Temperatur  $T$  und bei Druck  $p$  gemessene Volumen auf das Volumen rück, das bei normierten Bedingungen gemessen würde.

Dadurch bekommt man eine von der Zusammensetzung des Gases, des Druckes und der Temperatur unabhängige Größe  $V_{norm}$

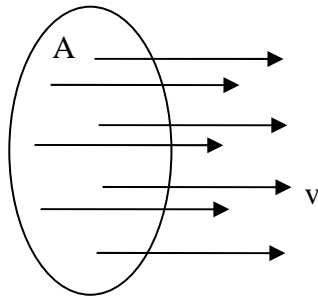
### Normbedingungen:

Normtemperatur =  $0^\circ\text{C} = 273\text{ K}$   
Normdruck =  $1,013\text{ bar}$

### Normvolumen:

$$V_{norm} = \frac{\text{Absolutbetriebsdruck [bar]} \cdot 273\text{ K}}{(273 + \text{Betriebstemperatur } [^\circ\text{C}]) \cdot 1,013\text{ bar}}$$

### 1.3. Durchfluss



Durchfluss ist die Anzahl von Gasteilchen die pro Zeiteinheit durch die Fläche A strömen.

Ausgehend von den Mengeneinheiten Masse, Volumen und Normvolumen ergeben sich diverse Durchflusseinheiten:

#### 1.3.1. Massendurchfluss

Der Massendurchfluss ist das Maß für die Menge eines Mediums bekannter Zusammensetzung, die pro Zeiteinheit strömt.

**Massendurchfluss:**

$$\dot{m} = \frac{\text{Masse}}{\text{Zeit}} = \frac{m[\text{kg}, \text{g}]}{t[\text{h}, \text{s}, \text{min}]}$$

Name der Einheit	Abkürzung	Gewandelt in SI-Einheit m/s
Kilogramm pro Sekunde	kg/s	1 kg/s
Kilogramm pro Minute	kg/min	0,01666667 = 1/60 kg/s
Kilogramm pro Stunde	kg/h	2,7778*10 <sup>-4</sup> = 1/3600 kg/s
Gramm pro Sekunde	GRPS (g/s)	10 <sup>-3</sup> kg/s
Gramm pro Minute	GRPM (g/min)	1,666667*10 <sup>-5</sup> kg/s
Gramm pro Stunde	GRPH (g/h)	2,7778*10 <sup>-7</sup> kg/s
Pound pro Sekunde	LBPS	0,453592370 kg/s
Pound pro Minute	LBPM	7,55987*10 <sup>-3</sup> kg/s
Pound pro Stunde	LBPH	1,26*10 <sup>-4</sup> kg/s

#### 1.3.2. Volumendurchfluss

Der Volumendurchfluss (Volumenstrom) ist das Volumen des Gases, das pro Zeiteinheit, zum momentanen Zustand, beschrieben durch die Temperatur T und Druck p, durch eine Fläche A strömt.

**Volumendurchfluss:**

$$\dot{V} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Zeit}} = \frac{V [m^3, cm^3]}{t [h, s, min]}$$

Name der Einheit	Abkürzung	Gewandelt in SI-Einheit m/s
Kubikmeter pro Sekunde	m <sup>3</sup> /s	1 m <sup>3</sup> /s
Kubikmeter pro Minute	m <sup>3</sup> /min	0,01666667 = 1/60 m <sup>3</sup> /s
Kubikmeter pro Stunde	m <sup>3</sup> /h	2,7778*10 <sup>-4</sup> = 1/3600 m <sup>3</sup> /s
Kubikdezimeter pro Sekunde	dm <sup>3</sup> /s	10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s
Kubikcentimeter pro Sekunde	CCS (cm <sup>3</sup> /s)	10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s
Kubikcentimeter pro Minute	CCM (cm <sup>3</sup> /min)	1,666667*10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> /s
Liter pro Sekunde	LPS (l/s)	10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s
Liter pro Minute	LPM (l/min)	1,666667*10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s
Liter pro Stunde	LPH (l/h)	2,77778*10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /s
Milliliter pro Sekunde	ml/s	10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s
Milliliter pro Minute	ml/min	1,666667 *10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> /s
Cubicfeet pro Sekunde	CFH (ft <sup>3</sup> /s)	2,83168*10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> /s
Cubicfeet pro Minute	CFM (ft <sup>3</sup> /min)	4,71947*10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /s
Gallonen pro Minute (GB)	GPM	7,57682*10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s
Gallonen pro Minute (US)	GPM	7,34147*10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s

**1.3.3. Norm - Volumendurchfluss**

Als Mediums und Zustands-unabhängige Durchflussgröße wird der Volumenstrom auf Normbedingungen rückgerechnet:

**Norm -Volumendurchfluss:**

$$\dot{V}_{norm} = \frac{\text{Normvolumen}}{\text{Zeit}} = \frac{V_{norm} [Nm^3, Ncm^3]}{t [h, s, min]}$$

Name der Einheit	Abkürzung	Gewandelt in SI-Einheit m/s
Norm Kubikmeter pro Sekunde	Nm <sup>3</sup> /s	1 Nm <sup>3</sup> /s
Standard Kubikcentimeter pro Sekunde	SCCS (Ncm <sup>3</sup> /s)	10 <sup>-6</sup> Nm <sup>3</sup> /s
Standard Kubikcentimeter pro Minute	SCCM (Ncm <sup>3</sup> /s)	1,666667*10 <sup>-8</sup> Nm <sup>3</sup> /s
Standard Liter pro Sekunde	SLPS (NI/s)	10 <sup>-3</sup> Nm <sup>3</sup> /s
Standard Liter pro Minute	SLPM (NI/min)	1,666667*10 <sup>-5</sup> Nm <sup>3</sup> /s
Standard Liter pro Stunde	SLPH (NI/h)	2,77778*10 <sup>-7</sup> Nm <sup>3</sup> /s
Standard Cubicfeet pro Sekunde	SCFH (ft <sup>3</sup> /s)	2,83168*10 <sup>-2</sup> Nm <sup>3</sup> /s
Standard Cubicfeet pro Minute	SCFM (ft <sup>3</sup> /min)	4,71947*10 <sup>-4</sup> Nm <sup>3</sup> /s

## 2. Berechnung des Durchflusses

Der Volumendurchfluss ist der direkte Zusammenhang zwischen der durchströmten Fläche und der Geschwindigkeit der Gasteilchen.

**Volumendurchfluss = mittlere Geschwindigkeit · durchströmte Fläche**

$$\dot{V} [m^3 / s] = \bar{v} [m / s] \cdot A [m^2]$$

Durch diesen Zusammenhang können auch Normvolumendurchfluss und Massenstrom durch die Messung der mittleren Geschwindigkeit berechnet werden. Dazu ist es aber auch notwendig zusätzlich zur Geschwindigkeit des Mediums auch dessen Druck (Absolutdruck) und Temperatur zu messen. Damit kann der gemessene Volumenstrom auf Normbedingungen rückgerechnet werden.

**Normvolumendurchfluss = Volumendurchfluss bei Normbedingungen**

$$\dot{V}_{norm} [Nm^3 / s] = \dot{V} [m^3 / s] \cdot \frac{p [bar] \cdot 273 K}{(273 + T [^{\circ}C]) \cdot 1,013 bar}$$

Mit der Dichte des strömenden Gases kann der Massenstrom berechnet werden. Dafür muss das durchströmende Gas bekannt sein.

**Massenstrom = Norm-Volumendurchfluss · Luftdichte bei 0°C und 1,013 bar**

$$\dot{m} [kg / s] = \dot{V}_{norm} [Nm^3 / s] \cdot 1,275 [kg / Nm^3]$$

### 3. Durchflussmessung mittels E+E Heißfilmanemometer:

Ein Heißfilmanemometer misst vom Prinzip her die Anzahl der Teilchen, die über den Heizer strömen und so Wärme abführen. Das bedeutet, dass bei höherem Luftdruck auch die Dichte der Teilchen steigt.

Will man nun vom Sensorsignal eines Heißfilmanemometers auf die am Sensor herrschende Strömungsgeschwindigkeit schließen, muss dieser Druck korrigiert werden.

Bei E+E werden alle Luftgeschwindigkeits-Transmitter auf Normdruck 1,013 bar kalibriert. Weicht der atmosphärische Luftdruck von 1,013 bar ab muss dies korrigiert werden.

#### Luftgeschwindigkeit:

$$v[m/s] = v_{\text{Transmitter}}[m/s] \cdot \frac{1,013 \text{ bar}}{p[\text{bar}]}$$

Auch die Temperatur hat einen leichten Einfluss auf den Messwert des Luftgeschwindigkeitsmessgerätes. Im Falle der E+E Luftgeschwindigkeits-Transmitter wird dieser Einfluss jedoch intern korrigiert.

Misst man die mittlere Luftgeschwindigkeit in einer Rohrleitung, kann mittels bekannter Durchflussfläche A auf den Luft Volumendurchfluss geschlossen werden.

#### Volumendurchfluss:

$$\dot{V}[m^3/s] = A[m^2] \cdot v_{\text{Transmitter}}[m/s] \cdot \frac{1,013 \text{ bar}}{p[\text{bar}]}$$

Bei den meisten industriellen Anwendungen ist der Volumendurchfluss bei Normbedingungen gefragt. In dieser Anwendung zeigt sich der Vorteil der E+E Kalibration bei Normdruck von 1,013 bar. Durch die gegensätzliche Druckabhängigkeit des Norm-Volumendurchflusses gegenüber des Volumendurchflusses kürzt sich diese aus der Berechnung. Das heißt: Normvolumendurchfluss, und damit auch der Massenstrom kann mittels E+E Luftgeschwindigkeits-Transmitter druckunabhängig gemessen werden!

#### Norm-Volumendurchfluss:

$$\dot{V}_{\text{norm}} [Nm^3/s] = A[m^2] \cdot v_{\text{Transmitter}}[m/s] \cdot \frac{273 \text{ K}}{(273 + T[^\circ C])}$$

#### Massendurchfluss:

$$\dot{m}[kg/s] = A[m^2] \cdot v_{\text{Transmitter}}[m/s] \cdot \frac{273 \text{ K}}{(273 + T[^\circ C])} \cdot 1,275 [kg/Nm^3]$$