

# Dichtemessung Grundlagen

## Schulungsunterlage (MEMS-CHIP)





# Grundlagen der Dichtemessung

## Auf einen Blick

In diesem Abschnitt erhalten Sie einen ersten Einblick in die Grundlagen der Dichtemessung. Sie erfahren, dass es sich bei der Dichte um eine temperatur- und druckabhängige Stoffeigenschaft handelt, die häufig mit der Einheit  $\text{kg/m}^3$  bzw.  $\text{lb/ft}^3$  angegeben wird. Der Dichtewert wird für die Bestimmung von Konzentration, mittlerer Molmasse und Gehalt benötigt. Wird die Dichte von Gasen ermittelt, muss beachtet werden, dass sie vom jeweiligen Druck abhängig ist. Die Dichte von Flüssigkeiten ist abhängig von der Temperatur

## Inhalte

- Was ist Dichte?
- Wofür werden Dichteangaben benötigt?
- Welche Messmethoden gibt es für die Bestimmung der Dichte?

## Was ist Dichte?

Die Dichte ist eine physikalische Stoffeigenschaft, die temperatur- und druckabhängig ist. Sie gibt Aufschluss darüber, wie schwer ein Stoff ist. Wird die Masse von zwei Stoffen derselben Menge verglichen, hat der Stoff mit dem höheren Gewicht die höhere Dichte.

Die Dichte  $\rho$  (Rho) wird als Masse  $m$  pro Volumeneinheit  $V$  definiert.

### Dichteformel

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Stoffe können als Reinstoffe, Gemische oder Verbindungen vorkommen. Werden die Massen der einzelnen Stoffe pro Volumeneinheit addiert, erhält man die Dichte eines Stoffgemisches:

### Dichteformel von Stoffgemischen

$$\rho = \frac{1}{V} \sum_i m_i$$

### Umrechnung SI-Einheiten:

$$1 \text{ kg/m}^3 = 1000 \text{ g/m}^3 = 0,001 \text{ g/cm}^3 \\ = 0,000001 \text{ kg/cm}^3$$

Die SI-Einheit der Dichte lautet Kilogramm pro Kubikmeter ( $\text{kg/m}^3$ ).

Die US-Einheit der Dichte wird in Pfund pro Kubikfuß ( $\text{lb/ft}^3$ ) angegeben.

Zudem gibt es produkt- oder branchenspezifische Einheiten. So z.B. das Grad Oechsle ( $^{\circ}\text{Oe}$ ) oder das Grad Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ). Die Einheiten geben die Dichte bzw. den Zuckergehalt von Most oder von Zucker/Wasser-Lösungen an.

### Die Dichte ist druck- und temperaturabhängig.

Aufgrund der thermischen Ausdehnung und der Kompressibilität wird die Dichte eines Stoffes von der vorherrschenden Temperatur und dem Druck beeinflusst. Abhängig davon, ob es sich um einen Feststoff oder um ein Fluid handelt, wirken diese Einflussgrößen stärker oder weniger stark auf die Dichte ein.

Die Temperatur- und Druckabhängigkeit ist bei Fluiden sehr viel höher als bei Feststoffen. Um eine präzise Dichteangabe zu erhalten, müssen daher insbesondere bei Fluiden die zugehörige **Temperatur** sowie der **Druck** bekannt sein.

### Das Volumen und die Dichte verändern sich mit einer Temperatur- und/oder Druckänderung. Die Masse bleibt dabei immer gleich.

Während sich die Dichte und das Volumen eines Stoffes durch Temperatur- und Druckeinfluss verändern, bleibt die Masse immer konstant. Wird das Volumen bei gleichbleibender Masse durch Druck- und/oder Temperatureinfluss verringert, erhöht sich die Dichte.



## Temperatur- und Druckeinfluss auf die Dichte einiger Fluide bei $t_{\text{ref}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $p_{\text{ref}} = 10 \text{ bar}$

Stoff	Dichte $\rho$ ( $t_{\text{ref}}, p_{\text{ref}}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	Dichte $\rho$ ( $t_{\text{ref}} + 1 \text{ }^{\circ}\text{C}, p_{\text{ref}}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	$\Delta\rho$ ( $\Delta T = 1 \text{ K}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	Dichte $\rho$ ( $t_{\text{ref}}, p_{\text{ref}} + 1 \text{ bar}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	$\Delta\rho$ ( $\Delta p = 1 \text{ bar}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )
Gase					
Helium	1,634	1,629	-0,006	1,80	0,163
Luft	11,92	11,88	<b>-0,04</b>	13,12	<b>1,2</b>
CO <sub>2</sub>	19,10	19,02	-0,08	21,14	2,04
Methan	6,70	6,68	-0,02	7,39	0,69
Flüssigkeiten					
Propan	500,52	498,95	-1,57	500,80	0,28
Wasser	998,62	998,41	<b>-0,21</b>	998,66	<b>0,04</b>
Ethanol	790,22	789,36	-0,86	790,30	0,08
Pentan	626,86	625,89	-0,97	626,99	0,13

Quelle: NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database

In der Tabelle ist zu erkennen, dass sich die Dichte von Gasen bei einer Temperaturveränderung von einem Kelvin kaum verringert. So sinkt sie bei Luft lediglich um ca.  $0,04 \text{ kg/m}^3$ . Mit dem MEMS-Chip könnte eine solche Veränderung nicht eindeutig festgestellt werden. Wird der Druck jedoch um 1 bar erhöht, erhöht sich die Gasdichte im Beispiel von Luft um  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Die Dichte einer Flüssigkeit verändert sich bei einer Druckänderung von 1 bar hingegen kaum.

### Um Stoffe untereinander besser vergleichen zu können, kann die Dichte eines Stoffes in eine sogenannte Normdichte oder in eine spezifische Dichte umgerechnet werden.

Die **Normdichte** (auch „**Reference Density**“ genannt) gibt die Dichte eines Stoffes oder Stoffgemisches bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck an. Sie ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit von verschiedenen Dichtewerten untereinander. Die folgenden **Standardbedingungen** für Temperatur  $t_n$  und Druck  $p_n$  werden in den aufgeführten Branchen häufig verwendet:

### Standardbedingungen von Normdichten verschiedener Branchen

Branche	Temperatur $t_n$	Druck $p_n$
Physik	0 °C	1,01325 bar
Chemie	0 °C	1,000 bar
Öl & Gas	15 °C/60 °F	1,013 bar
Medizin	37 °C	Luftdruck
Labor	20 °C	1013 mbar

Quelle: in Anlehnung an <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardbedingungen>

Die Normdichte von Stoffen bzw. Stoffgemischen kann sogenannten Dichtetabellen entnommen werden. Beispiele für Dichtetabellen finden sich u.a. hier:

- Alkohol:** Standard OIML R 22 „International Alcoholmetric Tables“ von 1973 (<http://www.oiml.org/en>)
- Zucker:** Standard ICUMSA „Densimetry and Tables: Sucrose -Official; Glucose, Fructose and Invert Sugar - Official ICUMSA Method SPS-4“ von 1998 (<http://www.icumsa.org>)



- **Wasser:** PTB-Mitteilungen Wagenbreth, H.; Blanke, W.: „Die Dichte des Wassers im Internationalen Einheitensystem und in der Internationalen Praktischen Temperaturskala“ von 1968 sowie Bettin H.; Blanke W.: „Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala“ von 1990
- **Gase:** Datenbank von NIST „NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database“ (<http://www.nist.gov>)

Die **spezifische Dichte  $d$** , auch als relative Dichte bekannt, beschreibt das Verhältnis von zwei Dichtewerten. Dabei wird die Dichte eines Stoffes mit der jeweiligen Normdichte oder einer anderen Bezugsgröße (z.B. Luft) ins Verhältnis gesetzt. Die spezifische Dichte ist eine dimensionslose Größe ohne Einheit.

#### Berechnung der spezifischen Dichte $d$

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{Luft}}}$$

#### Wofür werden Dichteangaben benötigt?

Die Dichte ist ein Standardwert für die Charakterisierung von Stoffen und Stoffgemischen und wird daher häufig in der Analytik und bei der Synthese von Stoffen eingesetzt.

Der Dichtewert ermöglicht die Ableitung verschiedener Kenngrößen, die Rückschlüsse auf die Zusammensetzung eines Gemisches oder einer Verbindung zulassen.

Sehr häufig wird mithilfe der Dichte die **Konzentration** eines Stoffes in einer wässrigen Lösung bestimmt. Dabei kann die mengenmäßige Größe eines (Rein-)Stoffes in einem Gemisch in Volumenprozent, Massenanteil oder als Stoffmengenkonzentration angegeben werden.

Zudem wird die Qualität eines Stoffgemisches oder einer Stoffverbindung häufig mit der **mittleren Molmasse** (mittlere molare Masse) beurteilt. Die mittlere

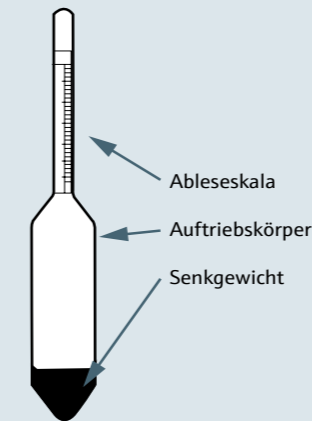
Molmasse kann ebenfalls mithilfe der Dichte ermittelt werden und ermöglicht z.B. eine Charakterisierung von Erdgas.

#### Welche Messmethoden gibt es für die Bestimmung der Dichte?

Es gibt zahlreiche Vorrichtungen und Messmethoden, mit denen die Dichte eines Stoffes bestimmt werden kann. Beim dem MEMS-Chip kommt mit der **Schwinger-Dichtemessung** ein relativ junges Prinzip zum Einsatz. Typischerweise werden aber auch heute noch ältere Messmethoden wie **Aräometer**, **Pyknometer** und **Auftriebswägungen** verwendet.

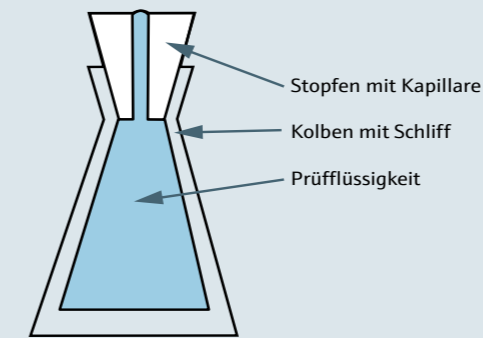


#### Messmethoden für die Bestimmung der Dichte



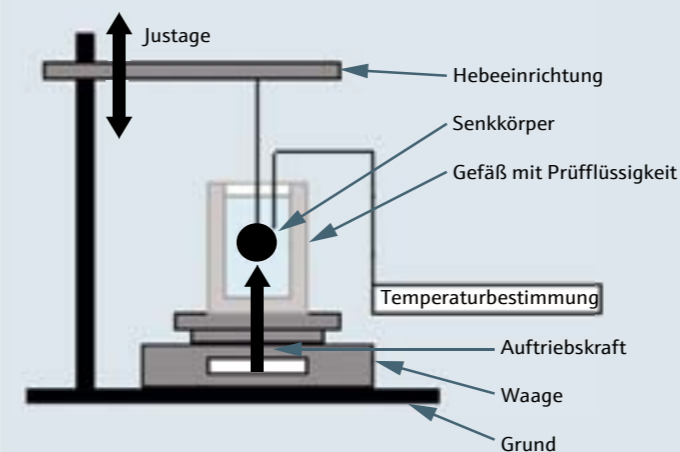
Für die Dichtemessung von Flüssigkeiten werden häufig **Aräometer** eingesetzt. Diese gläsernen Schwimmkörper werden in der Flüssigkeit platziert und sinken so lange ein, bis die Auftriebskräfte der Prüfliquidität ein Gleichgewicht zum Aräometergewicht bilden. Die Dichte der Flüssigkeit kann anhand der Eintauchtiefe des Schwimmkörpers abgeleitet werden.

Quelle: Flüssigkeit-Dichtemessung Übersichtsartikel 2002 Prof. Dr. G. Hradetzky (Hochschule Merseburg) Prof. Dr. K.-D. Sommer (PTB Braunschweig)



**Pyknometer** sind Wägegefäße, die zuerst leer und dann mit der zu messenden Flüssigkeit oder dem zu messenden Feststoff gewogen werden. Anhand der beiden Werte kann die Dichte berechnet werden.

Quelle: <http://www.physik.uni-halle.de/Lehre/Grundpraktikum/anleitungen/Pharma-Heft-11.pdf>, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg



Mithilfe des Auftriebsprinzips ist die Messung der Dichte auch mit **Auftriebswägung** möglich. In die zu messende Flüssigkeit wird ein Senkkörper getaucht, dessen Auftrieb mithilfe einer Waage gemessen wird. Der Quotient des Auftriebs und des Senkkörpervolumens ermöglicht die Berechnung der Dichte der Flüssigkeit.

Quelle: Artikel „Neues Messverfahren für Aräometer durch direkte Auftriebskraftmessung“ in WägeRaum (Ausgabe 10, 2004), Christian Buchner und Dietmar Steidl, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV)





# Die Schwinger-Dichtemessung

## Auf einen Blick

Im vorherigen Abschnitt haben wir die Grundlagen der Dichtemessung sowie die Definition von Dichte kennengelernt. Der vorliegende Abschnitt widmet sich der Schwingungsmethode, die auch Dichtesensoren für die Dichtemessung verwendet. Aus dieser Methode ergeben sich einige Vor- und Nachteile, die ausführlich beleuchtet werden.

## Inhalte

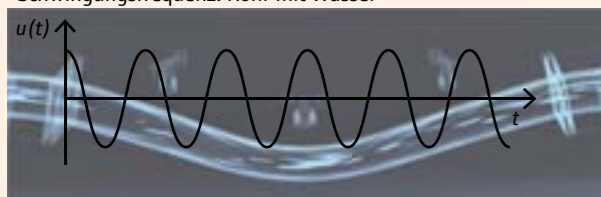
- Wie funktioniert die Schwinger-Dichtemessung?
- Welche Vorteile ergeben sich?
- Was sind kritische Einflussfaktoren (Nachteile)?
- Wo wird die Schwinger-Dichtemessung angewendet?
- Ermittlung der Methanzahl in Gasmotoren zur Effizienzsteigerung.

## Wie funktioniert die Schwinger-Dichtemessung?

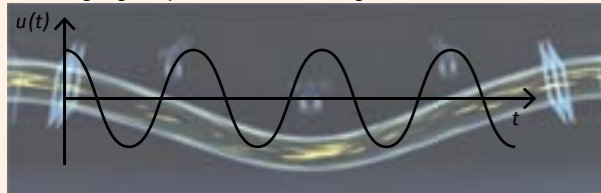
Bei der Schwinger-Dichtemessmethode wird die Dichte **indirekt durch eine Frequenzbestimmung** gemessen. Das zu messende Fluid wird dazu in ein Rohr (Schwinger) gefüllt, das in Resonanzschwingung versetzt wird. Die daraus resultierende Schwingungsfrequenz, die von der Dichte des Fluids sowie der Steifigkeit des Schwingers abhängig ist, gibt nun Aufschluss über die Dichte. Je grösser die Schwingungsfrequenz ist, desto kleiner ist die Dichte des Fluids.

## Abhängigkeit Fluidichte/Schwingungsfrequenz

Schwingungsfrequenz: Rohr mit Wasser



Schwingungsfrequenz: Rohr mit Honig



Quelle: TrueDyne Sensors AG, Animation Biegeschwinger

Die Eigenschaften des Schwingers (u.a. Steifigkeit) sind temperatur- und druckabhängig. Diese Abhängigkeiten werden anhand von Kalibriermessungen ermittelt und durch das Messgerät kompensiert.

Übrig bleibt als beeinflussbare Grösse somit nur die Dichte des Fluids.

Die folgende Gleichung verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Dichte  $\rho$  des Fluids, den Eigenschaften des Schwingers (Konstanten A und B) sowie der Schwingungsfrequenz  $f$ :

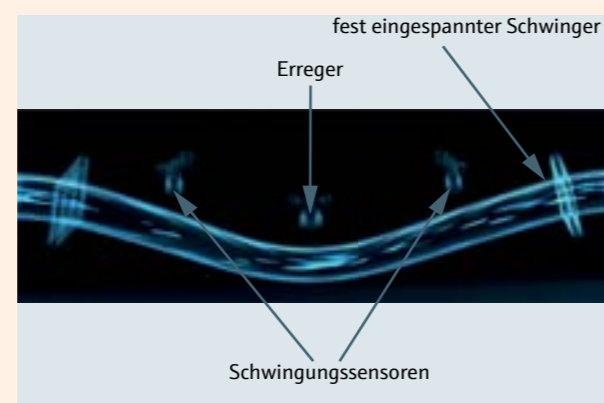
Zusammenhang zwischen Mediumsdichte  $\rho$  und Schwingungsfrequenz  $f$

$$\rho = A + \frac{B}{f^2}$$

Funktionsweise des Schwinger-Messgeräts:

- Schwinger ist an beiden Enden fest eingespannt.
- Erreger versetzt das Rohr in Schwingung.
- Schwingungssensoren erfassen die Schwingungsfrequenz.

## Aufbau eines Schwinger-Messgeräts



Quelle: TrueDyne Sensors AG, Animation Biegeschwinger

Form und Materialien des Schwingers sind dabei nicht fest vorgegeben. So kann es sich bei dem Schwinger sowohl um ein Rundrohr als auch um ein Vierkantrohr handeln.



## Welche Vorteile ergeben sich?

Die **einfache Handhabung**, die mit einem geringen prüftechnischen Aufwand einhergeht, ist einer der grössten Vorteile der Schwinger-Dichtemessung. Die Dichte wird nach Zugabe des Mediums gemessen, ohne dass weitere Einstellungen vorgenommen werden müssen. Ablesefehler können ausgeschlossen werden, da die Ausgabe des Dichtewerts über eine digitale Anzeige erfolgt. Eine Temperierung des Mediums ist nicht notwendig, stattdessen erfolgt die Temperaturmessung an Ort und Stelle. Zudem muss keine exakte Volumenmenge entnommen werden.

Die **mögliche Miniaturisierung** der Technologie erfordert nur **geringe Probemengen** zur zuverlässigen Dichtebestimmung. Diese Eigenschaft ist besonders für kostspielige Medien relevant. Die Verwendung geringer Probemengen erleichtert zudem die Bestimmung der Mediumstemperatur bei der Dichtemessung.

Die Messung kann in einem geschlossenen System und somit **unter Druck** erfolgen. Dies ist vor allem für bestimmte Medien wie Alkohol-Wassergemische oder Gase relevant. Ohne einen entsprechenden Druck verflüchtigen sich solche Medien, was zu falschen Messwerten führen würde.

Schliesslich stehen die Messergebnisse bereits in **kürzester Messzeit** zur Verfügung.

Schwinger-Messgeräte können zudem für eine **kontinuierliche Messung** mit Durchfluss direkt im Prozess eingesetzt werden.

**Was sind kritische Einflussfaktoren (Nachteile)?** Die Methode ermöglicht **keine direkte Rückführbarkeit**, d.h. der Dichtemesswert kann nicht mit den nationalen Normalen ( $\text{kg}$  und  $\text{m}^3$ ) für diese Messgrösse verglichen werden. Grund dafür ist, dass die Dichte über eine gemessene Frequenz berechnet wird. Für die Berechnung sind mindestens zwei Referenzmedien mit bekannter Dichte notwendig. Eine Rückführbarkeit ist daher nur über diese beiden Referenzmedien möglich.

Die Messempfindlichkeit wird durch die Beschaffenheit des Messrohrs beeinflusst. Je kleiner das **Eigengewicht des Messrohrs** ist, desto geringer ist sein Einfluss auf die Frequenz und umso höher ist die

Messempfindlichkeit. Die Bestimmung von geringen Mediumsmassen bei gleichzeitig hohem Eigengewicht des Messrohrs ist hingegen problematisch.

Die mechanischen Eigenschaften des Schwingers werden durch **Druck- und Temperatureinflüsse** verändert. Infolgedessen verändert sich auch die Frequenz. Durch Kalibrierungen mit verschiedenen Druck- und Temperaturpunkten können diese Abhängigkeiten kompensiert werden.

Darüber hinaus ist die Frequenz auch von der **Viskosität** der Messflüide abhängig. Dies kann weitere Messunsicherheiten zur Folge haben.

**Luftblasen** in der Messflüssigkeit können zudem zu Messfehlern führen. Dies ist nicht der Fall, wenn vor der Messung eine Entgasung vorgenommen wird.

Das Messergebnis kann durch **Verunreinigungen** des Schwingers verfälscht werden. Ein sauberer Schwinger ist an der korrekten Luftdichte im leeren Zustand zu erkennen.

## Wo wird die Schwinger-Dichtemessung angewendet?

Die Bestimmung der Dichte von Fluiden mithilfe der Schwinger-Dichtemessmethoden eignet sich besonders in Branchen mit verschiedenen Genauigkeitsanforderungen in Labor und Prozess:

- In der Öl- und Gasbranche z.B. zur Bestimmung von Heizwert, Energiegehalt oder zur Ermittlung der Zusammensetzung.
- In Tankstellen zur Abrechnung des korrekten Werts und bestimmen von Fremdpartikeln.
- Im Transport zur Abrechnung des korrekten Wertes und zur Kontrolle des Mediums.
- Bei Flugzeugbetankungen zur Optimierung der Füllmenge auf Distanz.
- Bei Motorenprüfständen zur Prüfung der konstanten Treibstoffqualität.
- Etc.





# Die MEMS-Technologie

## Auf einen Blick

Im vorherigen Abschnitt haben wir die Schwingungsmessungsmethode kennengelernt. Der vorliegende Abschnitt behandelt die Entstehung der MEMS-Technologie bei TrueDyne Sensors AG. Die Technologie hat den MEMS-Sensor hervorgebracht, dessen Herzstück ein schwingender Silizium-Messkanal ist. Im Vergleich zur konventionellen Schwinger-Technologie vereint er zahlreiche Vorteile. Diese reichen von seiner geringen Grösse und einem breiten Anwendungsbereich über die exakte Dichtebestimmung von Gasen, auch bei geringem Druck, bis hin zu einer überaus schnellen Reaktionszeit.

## Inhalte

- Was ist die MEMS-Technologie?
- Wo werden MEMS-Technologien eingesetzt?
- Wie ist der TrueDyne Sensors AG MEMS-Chip aufgebaut?
- Welche Chancen bietet die MEMS-Technologie?

## Was ist die MEMS-Technologie?

MEMS steht für **Micro-Electro-Mechanical Systems**. Die Technologie vereint mikroelektronische und mikromechanische Komponenten in einem komplexen Mikrosystem, das auf einer Silizium-Halbleitertechnologie basiert.

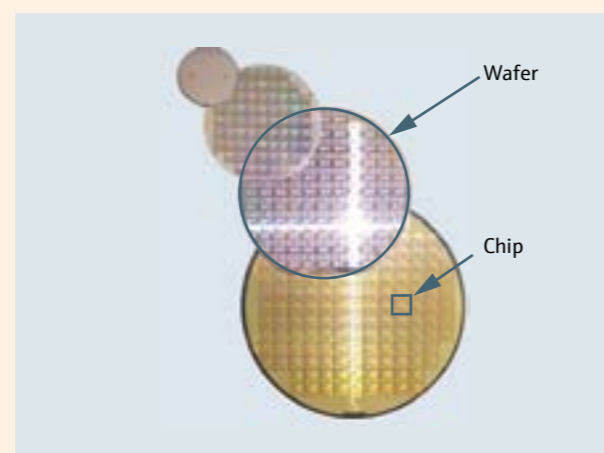
Bei der **Halbleitertechnologie** werden anhand verschiedener Verfahrenstechniken, z.B. mit Fotolithografie und Dünnschichttechnik, mehrere elektronische Komponenten auf einem Halbleiter-Substrat (häufig aus Silizium) strukturiert und zu einem Chip aufgebaut. Da die Einzelschritte für die Herstellung eines Chips sehr aufwendig sind, vervielfältigt man diese Arbeitsschritte und stellt mehrere Chips gleichzeitig her. Dies geschieht mit einem kreisrunden oder quadratischen, scheibenförmigen **Wafer**, der aus dem Material des benötigten Substrats besteht.

Mit der Halbleitertechnologie lassen sich elektronische Schaltungen, die in der klassischen Elektronik aus mechanisch angefertigten Komponenten bestehen, **miniaturisieren**. Ein **TrueDyne Sensors AG MEMS-Chip** beinhaltet nicht nur **elektronische**, sondern auch **mechanische** und **fluidische Funktionen**.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die einzelnen Bauteile beschränkt sich ein TrueDyne Sensors AG MEMS-Chip meist nicht nur auf ein Silizium-Substrat. Stattdessen werden für die verschiedenen Komponenten **unterschiedliche Materialien** verwendet, die

mithilfe diverser Aufbau- und Verbindungstechniken zusammengeführt werden.<sup>1</sup>

## Kreisrunde Wafer



Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wafer>

## Wo werden MEMS-Technologien eingesetzt?

MEMS-Technologien gewinnen immer mehr an Bedeutung. Sie werden in den unterschiedlichsten Gebieten eingesetzt und sind in unserem Alltag allgegenwärtig. MEMS-Systeme finden vermehrt in der **Automobilindustrie Verwendung**, z.B. zur Diebstahlsicherung, für die Airbag-Kontrolle oder in Fahrzeugüberschlag-Erkennungssystemen. Darüber hinaus kommen sie im **Mobilfunkbereich** bei der Navigation, zur Displayausrichtung oder beim mobilen Gaming zum Einsatz. Grosses Anwendungspotenzial von mikrofluidischen Systemen gibt es auch in der **Medizintechnik**, insbesondere in der biomolekularen Analytik. Stichwörter hier sind **Lab-on-a-Chip** oder **BioMEMS**.

<sup>1</sup> Quelle: Praxiswissen Mikrosystemtechnik, F. Völklein und T. Zetterer, 2006, Vieweg+Teubner Verlag



## Wie hat sich die MEMS-Technologie bei TrueDyne Sensors AG entwickelt?

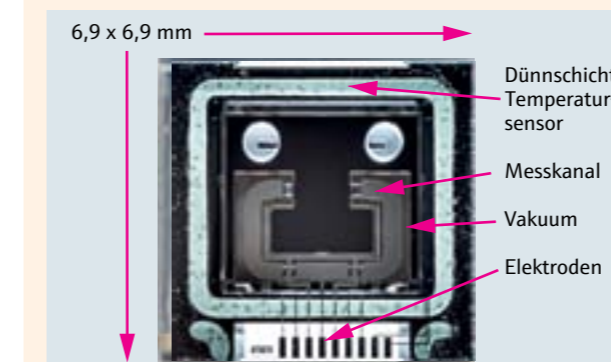
TrueDyne Sensors AG arbeitet bereits seit einigen Jahren an der Entwicklung und Umsetzung des **Coriolis-Messprinzips** als fluidisches Mikrosystem bzw. als MEMS-Chip. Dabei wird der für das Coriolis-Messprinzip notwendige fluidische Kanal aus einem Silizium-Substrat geformt und in einen MEMS-Chip integriert.

Für die Messung von Durchfluss hat sich dieses System für TrueDyne Sensors AG nicht bewährt. Jedoch hat sich gezeigt, dass der vibrierende Siliziumkanal sehr gut als **Schwinger-Dichtemesser** eingesetzt werden kann.

## Wie ist der TrueDyne Sensors AG MEMS-Chip aufgebaut?

Ein TrueDyne Sensors AG MEMS-Chip ist heute gerade einmal **6,9 x 6,9 x 1,5 mm** gross. Er beinhaltet elektronische Komponenten, einen fluidischen Messkanal sowie einen Temperatursensor.

## TrueDyne Sensors AG MEMS-Chip



Quelle: Launch-Unterlagen DLO-M1

Der TrueDyne Sensors AG MEMS-Chip wird mithilfe von insgesamt vier Wafern hergestellt:

- Zwei Siliziumwafer bilden den **Messkanal**. Der Messkanal wird mithilfe von Plasmaätztechnik geformt. Dazu wird je eine Hälfte des Kanals in einen Siliziumwafer geätzt. Der Kanal entsteht durch die Verbindung der beiden Hälften (Bondingverfahren).
- Ein Glaswafer enthält metallische **Elektroden**, fluidische Öffnungen sowie den **Temperatursensor**.

- Ein weiterer Siliziumwafer dient dazu, den Messkanal in **Vakuum** zu verpacken. Dadurch kann der Messkanal ohne Luftdämpfung schwingen.

## Welche Chancen bietet die MEMS-Technologie?

Aufgrund der **Miniaturisierung** (Messkanal = 0,5 µl Volumen) und der **Materialeigenschaften** (Silizium) des Kanals ergeben sich zahlreiche Vorteile und neue Anwendungsbereiche.

Die Miniaturisierung gewinnt vor allem in Anwendungen, bei denen **geringe Probemengen** und eine **kompakte Bauform** wichtig sind, an grosser Bedeutung.

Durch die thermischen und mechanischen Eigenschaften von Silizium steht zudem ein **leistungsfähiger Sensor** zur Verfügung.

**Silizium** ist ein guter Wärmeleiter. Der Kanal ist daher **keinen grossen Temperaturunterschieden** ausgesetzt. Die für die Dichtemessung erforderliche Temperaturinformation kann somit exakt und einfach ermittelt werden.

Auch die mechanischen Eigenschaften von Silizium sind bei der Dichtemessung von Vorteil. Durch die **geringe Eigenmasse** und die **geringe Steifigkeit** des Siliziumkanals wird eine sehr **hohe Messempfindlichkeit** erzielt. Diese Eigenschaft ist insbesondere bei leichten Fluiden bzw. bei **Gasen** von Bedeutung. So bleibt bei einer Gasmessung mit **niedrigem Druck** (der derzeit spezifizierter Druckbereich liegt zwischen 1 und 20 bar) eine hohe Messempfindlichkeit erhalten.

Der Siliziumkanal kann mit einer sehr **hohen Frequenz** schwingen. Dies führt zu einer **kurzen Messzeit** und zur Unabhängigkeit des Messsignals von äusseren, mechanischen Störvibrationen.



**Notizen:**

A large rectangular area with a light orange background, containing numerous horizontal dotted lines for writing notes.

