



# Temperatur- und Feuchtemessung

Temperatur und Feuchte der Umgebungsluft spielen im menschlichen Leben eine große Rolle. Im Wohnbereich hängen unsere Lebensqualität und Gesundheit in starkem Maß von der Wohnbehaglichkeit ab. In diesem zugegeben etwas unscharfen Begriff spielen Temperatur und Feuchte der uns umgebenden Luft und Wände eine wichtige Rolle. Nur wenn es in unseren vier Wänden nicht zu warm und nicht zu kalt, nicht zu trocken und nicht zu feucht und die Temperaturdifferenz zwischen Wänden und Raumluft nicht zu groß ist, können wir von einem gesunden Raumklima sprechen.

Auch in vielen industriellen Prozessen spielt die Einhaltung einer exakten Luftfeuchte und -temperatur eine entscheidende Rolle für die resultierende Qualität der Prozesse. Man denke an die Produktion, Verarbeitung, Lagerung und Verteilung von Lebensmitteln, Arzneien, Chemikalien und vieles mehr. Überall dort, wo Luftfeuchte und -temperatur in das Prozessergebnis eingehen, ist deren Wert exakt zu messen und über einen Regelungsmechanismus zum Be- oder Entfeuchten bzw. Heizen oder Kühlen in einen vorgegebenen Toleranzbereich zu führen. Oft ist dies durch regulatorische Anforderungen in jedem Glied der Wertschöpfungskette vorgeschrieben.

Die Qualifizierung der Prozessführung erfolgt nach international anerkannten Richtlinien, allen voran GMP und FDA. „Good Manufacturing Practice (GMP)“ (Gute Herstellungspraxis) ist ein Regelwerk zur Qualitätssicherung in der Herstellung von Pharmaprodukten, aber auch von Lebens- und Futtermitteln. In diesen Bereichen können Qualitätsabweichungen direkte Auswirkungen auf die Gesundheit des Konsumenten haben. Deshalb sind hier die Anforderungen an die lückenlose, manipulationssichere Dokumentation durch Datenaufzeichnung (Data-Logging) besonders streng. Bei Arzneimitteln für den amerikanischen Markt z. B. unterliegen sowohl das Herstellverfahren als auch das Prozessequipment den Anforderungen der amerikanischen „Food and Drug Administration (FDA)“. Aber auch ohne gesetzliche Vorgaben ist ein Produzent mit hohen Ansprüchen an die Qualität seiner Produkte gut beraten, klar definierte Prozesse nachweisbar genau zu beherrschen. Nur so lassen sich die Gründe für Qualitätsabweichungen nachvollziehen, entsprechende Gegenmaßnahmen ergreifen und eventuelle Regressansprüche abwehren.

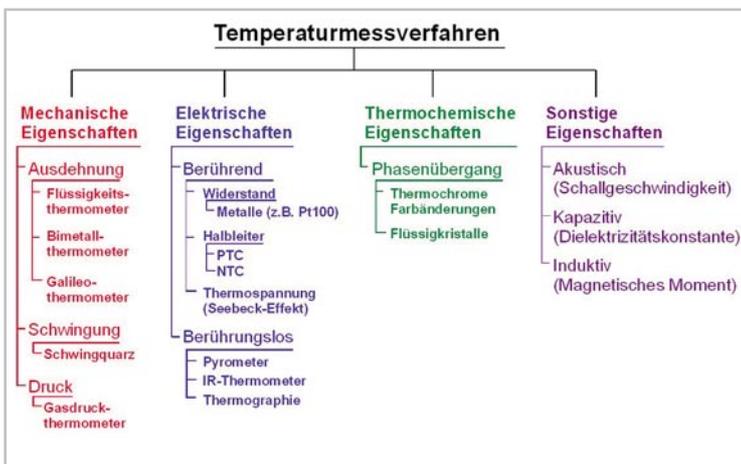


Bild 1: Systematische Darstellung der Temperaturmessverfahren

## Temperaturmessverfahren

Die Messung von Temperaturen ist ein weites Feld. Zahlreiche Verfahren existieren, von denen wir hier nur die wichtigsten streifen wollen. Die Grafik in Abbildung 1 zeigt die Fülle der Messverfahren in systematischer, unvollständiger Darstellung.

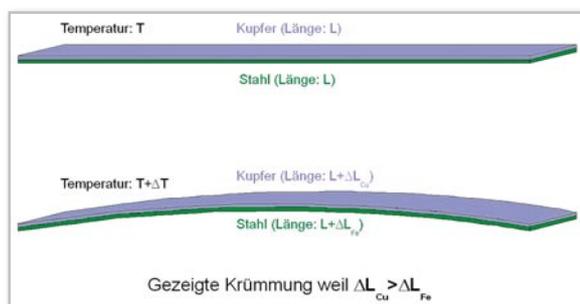
**Bild 2:** Bei einem Flüssigkeitsthermometer bewirkt die temperaturabhängige Volumenausdehnung im Vorratsgefäß das mehr oder weniger tiefe Eindringen der Flüssigkeit in das Steigrohr (Kapillare).



## Mechanische Eigenschaften

Hier werden temperaturabhängige Änderungen der Dimensionen von Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen auf eine Skala übertragen oder messtechnisch ausgewertet.

Am häufigsten verbreitet dürfte das **Flüssigkeitsthermometer** sein. Es ist als Fieberthermometer, in Wetterstationen, Gefriertruhen, als Badethermometer usw. in jedem Haushalt anzutreffen (Abbildung 2). Flüssigkeitsthermometer beruhen auf der Eigenschaft von Flüssigkeiten, sich proportional zu ihrer Temperatur auszudehnen, d. h. an Volumen zu- oder abzunehmen. In der üblichen Bauform besteht ein Flüssigkeitsthermometer aus einem Vorratsgefäß, das der zu messenden Temperatur ausgesetzt wird, und einem mit diesem in Verbindung stehenden Steigrohr (Kapillare). Je nach Temperatur dringt die Flüssigkeit mehr oder weniger weit in das Steigrohr ein. Weil Quecksilber wegen seiner linearen Ausdehnungseigenschaften eine gleichmäßige Skala erlaubte, wurde es früher nahezu ausschließlich als thermometrische Flüssigkeit verwendet. Geht das Thermometer zu Bruch, setzt es allerdings hoch giftige Quecksilberdämpfe frei. Deshalb verwendet man heute meist gefärbte Wasser-Alkohol-Mischungen und berücksichtigt Unlinearitäten bei der Ausdehnung in der Skalierung. Als Eichpunkte eignen sich besonders der Gefrierpunkt von Wasser (0 °C) und dessen Siedepunkt (100 °C). Die Temperatureinheit Celsius (°C) geht auf den schwedischen Naturwissenschaftler Anders Celsius (1701–1744) zurück.



**Bild 3:** Bimetall: Zwei miteinander verlötete Metallstreifen mit unterschiedlichem temperaturabhängigen Ausdehnungsverhalten krümmen sich bei Erwärmung.

**Bimetallthermometer** beruhen auf der unterschiedlichen Längenausdehnung zweier unterschiedlicher miteinander hart verlöteter oder verschweißter Metallstreifen mit unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten. Stahl hat zum Beispiel einen Ausdehnungskoeffizienten von  $12,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , Kupfer von  $16,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Weil sich die Streifen nicht gegeneinander verschieben können, krümmen sie sich.

**Bild 4:** Bimetallthermometer: robust, aber nicht allzu genau

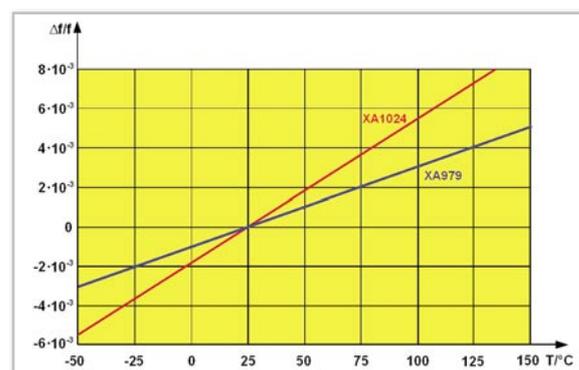


Das sich stärker ausdehnende Kupfer liegt dabei am äußeren Ende des Krümmungsradius (Abbildung 3).

Wird der Bimetallstreifen zur flachen Spirale geformt und deren innen liegendes Ende fixiert, macht das außen liegende eine temperaturabhängige Drehung um den Zentralpunkt und kann dabei einen Zeiger über eine Skala bewegen (Abbildung 4). Bimetallthermometer zeichnen sich durch ihre Robustheit aus, sind allerdings nicht allzu genau.

Das **Galilei-Thermometer** geht auf den italienischen Astronomen und Physiker Galileo Galilei (1564–1642) zurück. Er stellte fest, dass die Dichte (Masse pro Volumeneinheit) einer Flüssigkeit mit zunehmender Temperatur abnimmt (4 °C: 0,999972 g/cm<sup>3</sup>, 20 °C: 0,998234 g/cm<sup>3</sup>, 40 °C: 0,992247 g/cm<sup>3</sup>). Um diesen Effekt zur Temperaturanzeige nutzen zu können, setzt man in einen hermetisch abgeschlossenen und mit Wasser gefüllten Glaszylinder fünf bis zehn teilweise mit Flüssigkeit gefüllte Glaskugeln (Abbildung 5). Das Gewicht dieser Kugeln ist gestuft bis auf wenige Milligramm genau kalibriert. Der Auftrieb der Kugeln hängt vom Gewicht der von ihnen verdrängten Wassermenge ab. Bei tiefen Temperaturen (hohe Dichte) schwimmen deshalb alle Kugeln oben, wird die Flüssigkeit wärmer (Dichte nimmt ab), sinken die Kugeln nacheinander ab, am Anfang die schwerste, zum Schluss die leichteste.

Üblicherweise wird ein **Schwingquarz** als frequenzbestimmendes Element eines Quarzoszillators so geschnitten, dass Temperaturänderungen sich möglichst wenig auf die Schwingfrequenz auswirken. Anders bei Quarzen, die als Temperatursensoren dienen. Hier lässt sich durch eine geeignete Schnitttrichtung in Bezug auf die Kristallachse ein Temperaturgradient von 30...100 ppm/K erzielen (Abbildung 6). Ein Quarzoszillator mit einem Temperaturgradienten von 100 ppm/K, der bei 25 °C auf einer Grundwelle



**Bild 6:** Die Schwingfrequenz eines geeignet geschnittenen Quarzes ist streng proportional zu seiner Temperatur. (Quelle: KVG GmbH)

**Bild 5:** Das Prinzip des Galilei-Thermometers: Mit zunehmender Temperatur fällt die Dichte von Wasser, die Schwimmkörper erhalten weniger Auftrieb und sinken. (Quelle: Wikipedia)

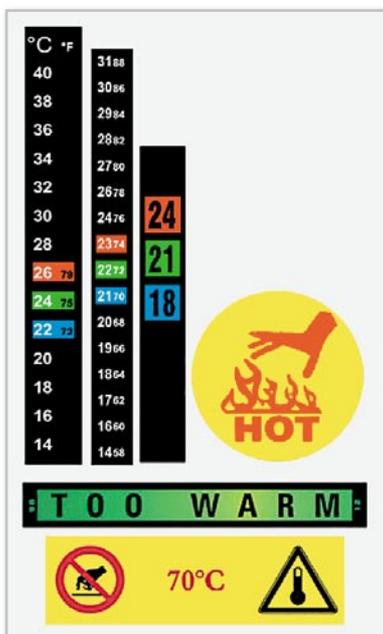




**Bild 7:** Eine Bourdonfeder streckt sich bei zunehmendem Druck des inneren Gases. (Quelle: Wikipedia)

von 10 MHz schwingt (1 kHz/K), steigert seine Schwingfrequenz bei 75 °C um  $10^6 \text{ Hz} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 50 \text{ K} = 50.000 \text{ Hz}$  auf 10,050.000 MHz. Überlagert man dieser Frequenz die eines temperaturstabilen Oszillators mit 10 MHz@25 °C in einer Mischschaltung, erhält man als Differenzfrequenz diese 50.000 Hz. Über einen Frequenzzähler ausgezählt, bestimmt dessen Gate-Zeit die Auflösung der Messung:  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$  ( $1 \text{ s}$ )  $\rightarrow = 10 \text{ mK}$  (1 mK). Messauflösung und Messzeit sind also umgekehrt proportional zueinander. Wegen der hohen Linearität des Temperaturgangs und der Konstanz seiner Ausgangsfrequenz (bei unveränderter Temperatur) eines als Sensor geschnittenen Quarzes ist die erzielbare Messgenauigkeit ebenfalls sehr hoch.

Bei einem **Gasdruckthermometer** wird die temperaturproportionale Ausdehnung eines Gases zur Anzeige gebracht. Das Messsystem besteht aus einem Druckraum mit aktivem Volumen, einem Kapillarrohr, einer Bourdonfeder und einem mechanischen Übersetzungsgetriebe, das die Bewegung der Bourdonfeder verstärkt und in eine Drehbewegung für den Skalenzeiger umwandelt (Abbildung 7). Eine Bourdonfeder ist eine bogenförmig gebogene Hohlfeder, die sich durch Erhöhung des Innendrucks streckt. Das Kapillarrohr verbindet den Druckraum mit der Bourdonfeder. Es kann in jede beliebige Form gebogen werden und bis zu 30 m lang sein, deshalb ist auch eine Fernmessung möglich. Für mechanische Thermometer ist der Temperaturbereich extrem. Er reicht von ca. -260 bis +800 °C. Hohe Präzision und eine sehr geringe Messhysterese, außerordentliche Stoß- und Vibrationsfestigkeit, hohe Umweltverträglichkeit durch den Einsatz von Edelgas und keine Abnutzungserscheinungen, woraus sehr



**Bild 8:** Flüssigkristalle und thermochrome Substanzen als Temperatur-Indikatoren. (Quelle: TH-Industrie)

große Kalibrierintervalle resultieren, sind die wichtigsten Eigenschaften des Gasdruckthermometers.

## Thermochemische Eigenschaften

Phasenübergänge in Materialien hängen von deren chemischen Eigenschaften ab, die wiederum in einem Zusammenhang mit ihrer Temperatur stehen. Zum Beispiel findet bei Wasser der Wechsel zwischen der eisförmigen (festen) und der flüssigen Phase bei einer Temperatur von 0 °C statt.

Thermochrome Farbänderungen sind eine auf Phasenwechsel beruhende Möglichkeit zur Temperaturmessung. Ein Beispiel sind sogenannte Temperaturmessfarben. Sie wechseln durch chemische Veränderungen bei bestimmten Temperaturen ihre Farbe (Farbumschlag) mehr oder weniger sprunghaft. Manche Temperaturmessfarben weisen auch mehrere Farbumschläge bei verschiedenen Temperaturen auf. Ähnliche Effekte nutzen Thermometerpapiere, die beim Erreichen einer bestimmten Temperatur schlagartig von weiß auf schwarz übergehen. Der Farbumschlag ist meistens nicht reversibel und kann deshalb z. B. zum Nachweis der Durchgängigkeit einer Kühlkette verwendet werden (Abbildung 8). Durch Einbettung geeigneter Farbstoffgemische in polymere Materialien lassen sich Polymerfolien, Spritzguss, Duromere und Hydrogele zu thermochromen Werkstoffen modifizieren. Die Farbschaltung erfolgt in Abhängigkeit der Temperatur und kann sowohl reversibel als auch irreversibel gestaltet werden (Quelle: Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP).

Der Einsatz thermochromer Flüssigkristalle (TLC: Thermochromic Liquid Crystal) eröffnet die Möglichkeit, flächenhafte reversible Temperaturmessungen an Flüssigkeiten oder Oberflächen von Festkörpern (Temperaturfelder) durchzuführen. Die Flüssigkristalle stehen dabei in direktem thermischen Kontakt mit dem Medium. Im Bereich der Einsatztemperatur genügt die innere Energie thermotroper Flüssigkristalle nicht, um die Ordnung der Moleküle der sogenannten Mesophase (Zustand zwischen fester und flüssiger Phase) vollständig aufzuheben. Bei einer Variation der Temperatur ändert sich das wellenlängenabhängige (Farb-)Reflexionsverhalten der TLC. Thermochrome Flüssigkristalle haben eine Starttemperatur, bei der die Rot-Reflexion (langwellig) beginnt. Bis zum Erreichen der Endtemperatur wird das gesamte Farbspektrum des sichtbaren Lichts über Gelb, Grün, Blau bis zu Violett durchlaufen.

## Sonstige Eigenschaften

**Akustische Thermometer** nutzen die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit aus. Über die Messung der Laufzeit eines akustischen Pulses nach dem Puls-Echo-Prinzip in einer Rohrsonde mit definierter Länge des hohlen Innenraums lässt sich dessen Temperatur sehr genau bestimmen. Auf der Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante beruhen **kapazitive Thermometer**, auf der des magnetischen Moments **induktive Thermometer**.

Im nächsten Teil der Folge beschäftigen wir uns mit den Messmethoden auf der Grundlage elektrischer Materialeigenschaften. Dabei spielen der resistive Thermofühler, der pn-Übergang eines Halbleiters und der Seebeck-Effekt eine wichtige Rolle.