

KNOW-HOW

Messgrößen im Fokus: Temperatur (I/VI)



Wer versteht, was sich hinter einer physikalischen Messgröße verbirgt, kann Ergebnisse richtig interpretieren und Entscheidungen treffen. In unserer neuen Artikelreihe „Messgrößen im Fokus“ erhalten Sie einen Überblick zu den physikalischen Eigenschaften der Messgrößen und die Funktionsweise der entsprechenden Messtechnik.

Die Erfassung von Temperaturen ist für viele Industrieprozesse von großer Bedeutung. Durch die direkte Kontrolle und Überwachung von Temperaturen können Qualitätskriterien für die verschiedensten Produkte und Prozesse eingehalten werden. Besonders in der Pharmaindustrie kann die Temperatur eine kritische Größe sein, die sowohl in der Produktion als auch während des Transportes und der Lagerung von pharmazeutischen Produkten konstant gehalten und somit überwacht werden muss (= Monitoring).

Theoretische Grundlagen zur Messgröße Temperatur

Die Temperatur ist eine physikalische Größe, die besonders in der Thermodynamik eine große Rolle spielt. Physikalisch gesehen kann man die Temperatur als die in einem Körper innenwohnende Energie beschreiben, die er aufgrund der Bewegung seiner Atome oder Moleküle besitzt.

Im Klartext bedeutet dies:

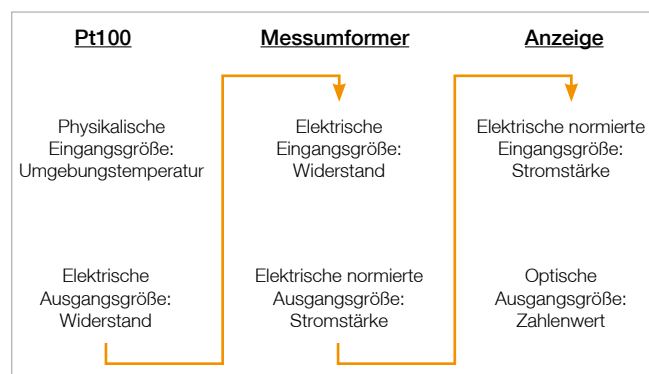
- Die Zufuhr von Wärmeenergie führt zur Zunahme der Teilchengeschwindigkeit und steigender Temperatur,
- das Entziehen von Wärmeenergie führt zur Abnahme der Teilchengeschwindigkeit und sinkender Temperatur.

KNOW-HOW

Messgrößen im Fokus: Temperatur (II/VI)

Aufbau einer Temperaturmesskette

Eine Temperaturmesskette setzt sich aus dem Sensor, dem Fühler, dem Messumformer und der Anzeige zusammen. Die Sensoren setzen den physikalischen Messwert in ein elektrisches Signal um, welches zunächst durch einen Messumformer in eine elektrisch normierte Ausgangsgröße umgewandelt wird. Das ausgehende Signal wird schließlich an der Messwertanzeige in ein Zahlenwert umgewandelt und ausgegeben.



Beispiel einer Temperaturmesskette

Welche Sensoren gibt es?

Die Auswahl des richtigen Sensors zur Messung der Temperatur bestimmt die Genauigkeit der Messergebnisse. Dabei ist zu beachten, dass die verschiedenen Sensoren unterschiedliche Anforderungen erfüllen.

- Ein großer Messbereich bedeutet in der Regel eine beschränkte Genauigkeit,
- besonders schnelle Fühler mit kurzen Angleichzeiten sind meistens nicht für robuste Alltagsmessungen geeignet,
- die Bauform entscheidet, welcher Fühler für welche Messungen geeignet ist.

Widerstandsthermometer

Widerstandsthermometer nutzen die Eigenschaft eines elektrischen Leiters, der mit der Temperatur seinen elektrischen Widerstand verändert.

Da sich die elektrischen Signale gut über weite Strecken übertragen lassen, können Mess- und Anzeigeort räumlich

voneinander getrennt sein. Die Messsignale können in Steuerungs- und Regelungsanlagen bzw. Prozessleitsystemen mit geringen Aufwänden eingebunden und verarbeitet werden. Bei den Widerstandsthermometern gibt es eine Unterscheidung zwischen Kalt- und Heißeitern.

Kaltleiter (PTC-Sensoren)

Ein Kaltleiter ist ein temperaturabhängiger Halbleiterwiderstand, dessen Widerstandswert beim Erreichen einer bestimmten Bezugstemperatur nahezu sprunghaft ansteigt. Infolge der sehr hohen positiven Temperaturkoeffizienten (relative Änderung einer physikalischen Größe bei Änderung der Temperatur gegenüber einer festgelegten Referenztemperatur) in diesem Bereich werden Kaltleiter auch als PTC-Widerstände (Positive Temperature Coefficient) bezeichnet. Sie leiten den elektrischen Strom bei tiefen Temperaturen besser als bei hohen Temperaturen. Zu den Kaltleitern gehören die metallischen Leiter Platin, Nickel und Iridium, wobei der Platin-Widerstand am häufigsten benutzt wird.

Heißeiter/Thermistorsensoren (NTC-Sensoren)

Heißeiter bestehen aus Metalloxiden, deren Widerstand mit zunehmender Temperatur abnimmt. Da die Widerstandskurve mit steigender Temperatur fällt, werden diese Widerstände auch als NTC-Widerstände (Negative Temperature Coefficient) bezeichnet. Heißeiter weisen einen negativen Temperaturkoeffizienten auf und leiten besser bei höheren Temperaturen.

Platinsensoren

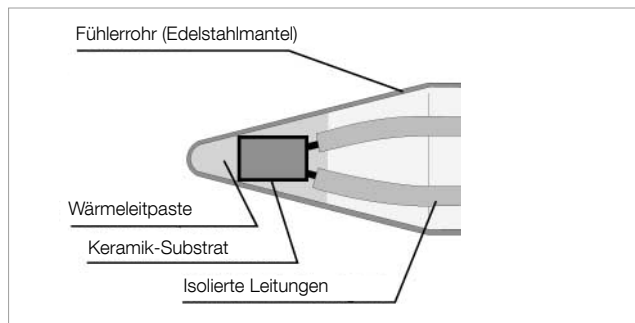
Platin-Widerstandssensoren besitzen eine hohe chemische Beständigkeit und eine gute Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften. Die Größe R_0 wird als Nennwert bezeichnet und gibt den Widerstandswert bei 0°C an. Beträgt der Nennwert z. B. 100 Ohm, spricht man von einem Pt100 Sensor. Er ist einer der am häufigsten eingesetzten Temperatursensoren und basiert auf dem Prinzip des Spannungsabfalls. Ein konstanter Messstrom wird dem Temperaturfühler zugeführt und durchfließt den Pt100 Platin-Sensor. Hierbei verhält sich die Spannungsänderung annähernd proportional (linear) zur Widerstandsänderung.

KNOW-HOW

Messgrößen im Fokus: Temperatur (III/VI)



Testo Präzisions-Temperaturfühler Pt100

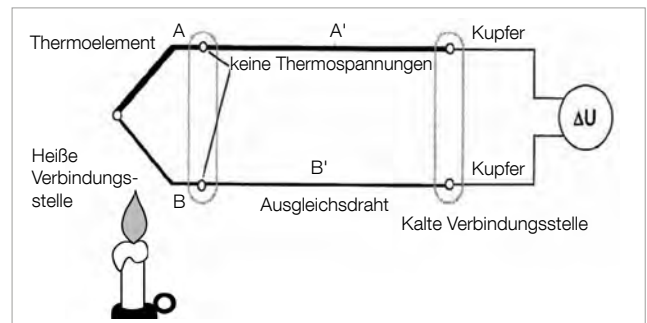


Aufbau eines Pt100 Fühlers

Thermoelementsensoren

Das Thermoelement ist ein Temperatursensor, der eine von der Temperatur abhängige Spannung liefert, die Thermospannung. Bei einem Thermoelement werden zwei Drähte aus verschiedenen Reinstmetallen oder Legierungen an ihren Enden zusammengeschweißt. Dadurch erhält man zwei Verbindungsstellen eines Thermopaars.

Befindet sich die Verbindungsstelle auf einem anderen Temperaturniveau als die Vergleichsstelle, kann durch Zwischenschalten eines Messinstrumentes in dem so entstandenen Thermokreis eine Gleichspannung gemessen werden. Sie ist ein Maß für die Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Vergleichsstelle. Ist eine der Temperaturen bekannt und die andere zum Zeitpunkt der Messung konstant, so kann die Spannung zur Messung der Temperatur herangezogen werden.



Aufbau eines Thermoelements

Welcher Sensor ist der passende?

Welche Sensoren sich für die Temperaturmessungen eignen, hängt von den Anforderungen und der Anwendung ab. Bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen treten im Vergleich zu Widerstandsthermometern höhere Messunsicherheiten auf, dafür können sie in einem wesentlich größeren Temperaturbereich eingesetzt werden und sind unempfindlicher gegenüber mechanischer Belastung. Die gängigen Pt-Sensoren und Thermoelemente unterscheiden sich in folgenden Eigenschaften.

Eigenschaften Pt-Sensoren	Eigenschaften Thermoelemente
Hohe Genauigkeit (Systemgenauigkeit bis +/- 0,05°C)	Schlechtere Genauigkeiten
Längere Angleichzeit	Schnelle Angleichzeit
Weiter „negativer“ Temperaturbereich (bis -200°C)	„Negativer“ Bereich eingeschränkt (bis -40°C)
Eingeschränkter Messbereich (-200°C... +600°C)	Weiter Messbereich abdeckbar (-40°C... +1.200°C)
Keine Hochtemperaturmessung möglich (bis +600°C)	Messung sehr hoher Temperaturen (bis +1.200°C)
Starre Fühlerrohre	Flexible Fühler verfügbar
Je nach Fühlerrohrmaterial (z. B. Glasmantel) Messung aggressiver Medien möglich	Je nach Fühlerrohrmaterial (z. B. Glasmantel) Messung aggressiver Medien möglich

Eigenschaftgen von Thermoelementen und Pt-Sensoren (die angegebenen Werte gelten für Sensoren der Firma Testo SE & Co. KGaA)

KNOW-HOW

Messgrößen im Fokus: Temperatur (IV/VI)

Welche Aufgaben haben die Fühler?

Temperaturfühler nehmen die Temperatur eines Mediums auf und leiten sie an den Sensor, der meist in der Fühlerspitze sitzt, weiter. Dazu muss sich das Material des Fühlers zunächst auf die Temperatur einstellen (Angleichzeit).

Aus diesem Grund wird nur die Temperatur des Sensors und nicht die des Mediums gemessen.

Zur Bestimmung der Angleichzeit der Sensoren an eine bestimmte Temperatur wird die sogenannte t_{99} -Zeit gemessen. Dies ist die Zeit bis der Sensor 99 % des Temperatursprunges anzeigt. Wie schnell ein Sensor bzw. ein Fühler diese Temperatur erreicht, hängt von der Bauform des Fühlers, Material und Dicke des Fühlerrohrs, der Verwendung von Wärmeleitpaste sowie dem Wert der zu messenden Temperatur ab.

Welche Fühlerbauformen gibt es?

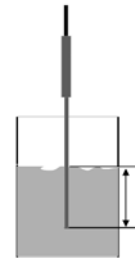
Je nach Anwendungszweck und Medium werden unterschiedliche Fühler eingesetzt:

Einbaufühler:

Fühler, die in Anlagen eingebaut sind und permanent die Temperatur z. B. in verschiedenen Medien messen. Die Messwerte werden anschließend auf dem Anzeigewert der jeweiligen Anlage bzw. der Leitwarte als optische Ausgangsgröße dargestellt.

Tauch- und Einstechfühler:

Tauch- und Einstechfühler werden direkt in das Messobjekt oder Medium eingeführt. Je größer das Messverhältnis von Fühler und Medium ist, desto mehr Energie wird dem Messobjekt entzogen. Da durch diesen Energieentzug nicht mehr die tatsächliche Temperatur des Objektes gemessen wird, kann eine zu hohe Masse des Fühlers zu Messfehlern führen. Bei der Messung sollte darauf geachtet werden, dass die Eintauchtiefe bzw. die Einstechtiefe das 10-15fache des Fühlerdurchmessers betragen soll. Ferner sollte bei Tauchmessungen in Flüssigkeiten die Flüssigkeit ständig in Bewegung gehalten werden.



Eintauchtiefe: 10-15fache des Fühlerrohrdurchmessers

Luftfühler:

Bei der Messung von bewegter Luft wird der Messfühler in die zu messende Umgebung gehalten. Hier besteht ein erschwerter Wärmeübertrag zwischen Luft und Sensor. Um eine kurze Ansprechzeit zu erzielen sollte idealerweise ein strahlungsgeschützter Luftfühler mit freiem Sensor genutzt werden.

Oberflächenfühler (berührend):

Der Fühlerkopf eines Oberflächenfühlers wird senkrecht auf die Oberfläche gedrückt. Hier muss darauf geachtet werden, dass weder die Auflagefläche des Fühlerkopfes, noch das Messobjekt uneben sind, da das die Messung verfälschen kann. Bei der Messung mit einem Oberflächenfühler ist stets die Fühlerspitze plan auf das Messobjekt zu setzen und ohne Bewegung mit gleich bleibender Ansetzkraft zu halten.

Oberflächenfühler (nicht berührend):

Jeder Körper sendet bei Erwärmung Strahlung aus. Dabei wird Energie transportiert, sodass mit Hilfe der Strahlung die Temperatur des Körpers berührungslos gemessen werden kann.

Kennzeichnender Parameter für die Art der Wellen ist die Wellenlänge. Messgeräte, mit denen man die von einem Körper ausgehende Strahlung messen kann und deren Ausgangssignale direkt einer Temperatur zugeordnet sind, werden Strahlungs-/Infrarotthermometer oder auch Strahlungspyrometer bzw. nur Pyrometer genannt.

Pyrometer werden für nicht berührende Temperaturmessungen eingesetzt. Sie werden bei Temperaturen im Bereich von -100 °C bis $+3.500\text{ °C}$ (Standard), in Sonderfällen bis 5.000 °C eingesetzt.

KNOW-HOW

Messgrößen im Fokus: Temperatur (V/VI)

Bekannte Strahlungsthermometer sind Wärmebildkameras:



Wärmebildkamera testo 882 der Firma Testo SE & Co. KGaA

Möglichkeiten der Temperatur-Kalibrierung

Unter dem Begriff „Kalibrieren eines Thermometers“ versteht man das Ermitteln der Messabweichung des Thermometers mit Hilfe einer Referenz/ eines Normals. Die Messabweichung ist die Differenz zwischen dem Sollwert der Referenz und dem angezeigten Temperaturwert bzw. dem Ausgangssignal des Thermometers (Prüfling). Grundsätzlich unterscheidet man hier drei Kalibrieremethoden:

- Kalibrierung an Fixpunkten
- Kalibrierung durch Vergleichsmessung
- Kalibrierung am Arbeitspunkt

Was sind Fixpunkte?

Stoffe besitzen verschiedene Aggregatzustände: flüssig, fest und gasförmig. Je nach Temperatur und Material liegen die drei Phasen eines Materials bei unterschiedlichen Werten, manchmal gibt es auch den Zustand, dass zwei oder alle drei Phasen nebeneinander bestehen (z. B. Wassertripelpunkt). Bei der Fixpunktmessung werden diese Aggregatzustände bestimmter Stoffe ausgenutzt. Änderungen der Aggregatzustände sind Phasenübergänge, z. B. Schmelz- oder Erstarrungspunkte. Der Übergang von den Phasen vollzieht sich immer bei der selben Temperatur (Annahme: konstanter Luftdruck).

Kalibrierung an Fixpunkten

Beim Kalibrieren an Fixpunkten setzt man den Prüfling einer

bekannten Temperatur aus, die einem reproduzierbaren, definierten Gleichgewichtszustand entspricht. Der Fixpunkt wird durch ein speziell festgelegtes Verfahren von Aufwärmen und Abkühlen hergestellt. Hat sich der Gleichgewichtszustand eingestellt kann mit der Kalibrierung begonnen werden. Der Sollwert (Referenzwert) ist der Temperaturwert des Fixpunktes, der Istwert kann am Prüfling abgelesen werden.

Gewichtszustand	°C	
Tripelpunkt Helium	-259,3467	
Tripelpunkt Neon	-248,5939	
Tripelpunkt Sauerstoff	-218,7916	
Tripelpunkt Argon	-189,3442	
Tripelpunkt Quecksilber	-38,8344	
Tripelpunkt Wasser	0,01	
Schmelzpunkt Gallium	29,7646	
Erstarrungspunkt Indium	156,5985	
Erstarrungspunkt Zinn	231,928	
Erstarrungspunkt Zink	419,527	
Erstarrungspunkt Aluminium	660,323	
Erstarrungspunkt Silber	961,78	
Erstarrungspunkt Gold	1064,18	
Erstarrungspunkt Kupfer	1084,62	

Übersicht thermodynamischer Fixpunkte

: Fixpunkte des Kalibrierlabors bei Testo Industrial Services

Kalibrierung durch Vergleichsmessung in Flüssigkeits- (Umwälz- bzw. Kalibrier-) bädern

Bei der Kalibrierung durch Vergleichsmessung werden Referenz und Prüfling einer konstanten Temperatur ausgesetzt, die z. B. in einem gerührten Flüssigkeitsbad oder einem Metallblock-Kalibrator erzeugt wird. Die tatsächliche Temperatur in der Einrichtung wird mit dem Normal (Referenz) gemessen und mit der Anzeige des Prüflings verglichen, nachdem sich ein thermisches Gleichgewicht zwischen den Thermometern und dem Kontaktstoff eingestellt hat.

Um bei diesem Vergleich eine geringe Messunsicherheit bzw.

KNOW-HOW

Messgrößen im Fokus: Temperatur (VI/VI)

einen kleinen Übertragungsfehler zu erzielen, ist neben einem geeigneten Referenzthermometer auch eine Temperiereinheit erforderlich, die eine homogene räumliche Temperaturverteilung sowie eine hohe zeitliche Temperaturkonstanz im Messraum gewährleistet.

Kalibrierung am Arbeitspunkt

Die Kalibrierung am Arbeitspunkt wird direkt am Einbauort des Fühlers vorgenommen. Dazu wird in der unmittelbaren Nähe des Temperaturfühlers ein Referenzfühler eingebracht und die Messabweichung unter möglichst stabilen Bedingungen durchgeführt.



Wie wähle ich die passenden Kalibrierpunkte?

In den meisten Fällen werden drei Kalibrierpunkte festgelegt. Bei sehr großen Temperaturbereichen werden gegebenenfalls weitere Kalibrierpunkte benötigt.

Die Auswahl der geeigneten Kalibrierpunkte erfolgt nach dem Anwendungsbereich des jeweiligen Fühlers. Wird ein Fühler beispielsweise für Messungen in Temperaturschranken genutzt, in denen Temperaturbereiche von 0 °C bis 100 °C herrschen, werden die Kalibrierpunkte 0°C, 50 °C und 100 °C gewählt. Die Kalibrierpunkte sollten also mindestens den Arbeitsbereich des Thermometers abdecken oder ihn gar überlappen.

Sie wollen weitere Informationen zur Messgröße Temperatur, zu Ihrer Messung und zur Kalibrierung der Temperaturmessgeräte?

> Werfen Sie einen Blick in unsere [Akkreditierungsurkunde](#).

> Gerne erstellen wir Ihnen ein unverbindliches [Angebot](#).

Kontakt für weitere Fragen unter 07661/90901 8000 oder info@testotis.de.

Text: Patricia Kossek, Testo industrial services GmbH