

Eintauchtiefen in thermische Systeme

von P. Klasmeier

Einleitung

Die Spitze eines Thermometers hat aufgrund des Wärmeflusses entlang des Schutzrohres eine andere Temperatur als das zu vermessende Medium. Die resultierenden Meßfehler hängen von der Eintauchtiefe ab. Die Mindesteintauchtiefe für exakte Messungen kann in Abhängigkeit von der Konfiguration, dem Typ des Temperaturfühlers, der Applikation und der erwünschten Genauigkeit aus dem Thermometer-Durchmesser ermittelt werden. So kann auch eine bessere Auswahl der Kalibriereinrichtung getroffen werden.

Ermittlung der notwendigen Eintauchtiefen

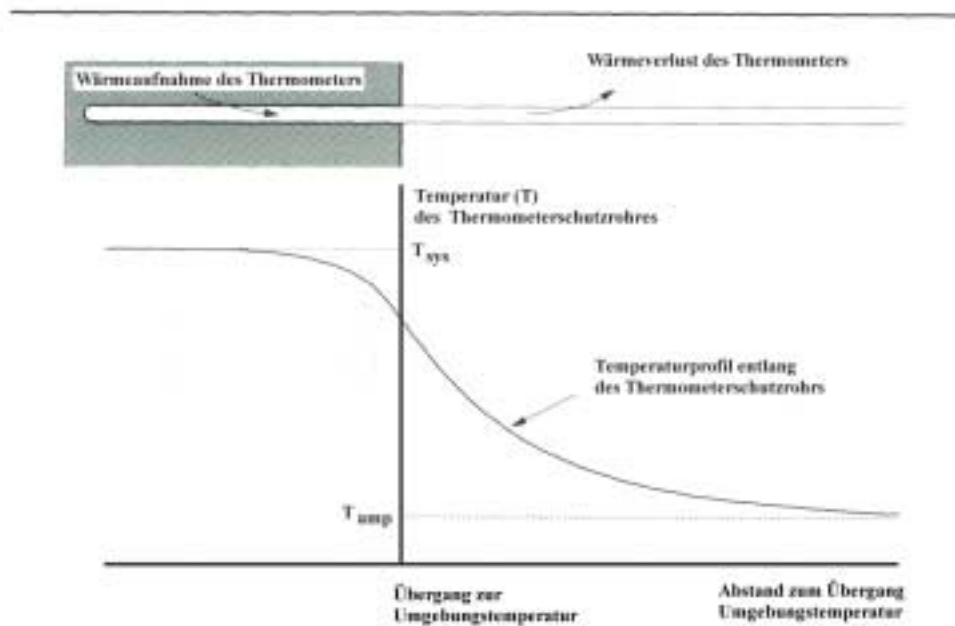
Die Temperatur, die ein Thermometer mißt, ist stets nur dessen eigene Temperatur. Das bedeutet, daß ein Thermometer ausreichend in das Medium, dessen Temperatur es bestimmen soll, eingetaucht sein muß, damit es dessen Temperatur annehmen kann. Ein Thermometer ist dann ausreichend eingetaucht, wenn sich durch zusätzliches eintauchen in das konstante Temperaturvolumen keine Änderung der angezeigten Temperatur ergibt. In allen Fällen, wo man Eintauchfehler vermutet, sollte man die Eintauchtiefe um ein oder zwei Thermometer-Durchmesser verändern und beobachten, ob die Anzeige konstant bleibt. Als grobe Annäherung gilt, daß jeweils 60% des Gesamtfehlers eliminiert werden, wenn die Eintauchtiefe um einen effektiven Durchmesser erhöht wird.

Die Eintauchtiefe, die notwendig ist, um die gesamte Genauigkeit des Thermometers auszunutzen, ist abhängig von zwei Faktoren: der zu messende Temperatur und der Thermometerkonstruktion. Sie sollte radiales Eindringen thermischer Strahlung ermöglichen und Längsstrahlung verhindern. Auch die erforderliche Eintauchtiefe erhöht sich bei Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur bis zu einem Maximum, das bei etwa 400 bis 500°C erreicht ist [1].

Tritt Wärmefluß entlang des Thermometer-Schutzrohrs zwischen dem Medium und der Umgebung auf, so zeigt dies, daß eine Temperaturdifferenz zwischen der Spitze des Thermometers und dem zu messenden Medium vorhanden ist [2] (Bild 1).



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
Browerstraße 39
36039 Fulda
Internet: www.klasmeier.com
Mail: info@klasmeier.com



[2]

Bild 1. Die Wärmeableitung entlang des Schutzrohrs ist die Ursache dafür, daß das Thermometer eine vom Medium abweichende Temperatur anzeigt. T_{sys} = Temperatur des Mediums, T_{amb} = Umgebungstemperatur.

Das Thermometer zeigt dann eine Temperatur an, die etwas geringer als die des Mediums ist. Ein einfaches Modell dieses Effektes zeigt den Fehler der Temperaturanzeige in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe:

$$\Delta T_m = (T_{\text{amb}} - T_{\text{sys}})k \exp\left(-\frac{L}{D_{\text{eff}}}\right)$$

[2]

Dabei sind T_{sys} die System- und T_{amb} die Umgebungstemperatur, L die Eintauchtiefe, D_{eff} der effektive Thermometer-Durchmesser und K ist eine Konstante. Mit dieser Gleichung, die in Bild 2 für $K = 1$ dargestellt ist, kann die Mindesteintauchtiefe ermittelt werden, die sicherstellt, daß der Fehler durch Wärmeableitung vernachlässigbar ist.

Aus Bild 2 lassen sich folgende Regeln ableiten:

- Für „industrielle“ Thermometer reicht eine Eintauchtiefe von 5 Durchmessern für eine Genauigkeit von 1% aus,



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
 Browerstraße 39
 36039 Fulda
 Internet: www.klasmeier.com
 Mail: info@klasmeier.com

- für gute Laborthermometer ist für eine Genauigkeit von 0,01% eine Eintauchtiefe von 10 Durchmessern empfehlenswert.
- für beste Laborpraxis sollte das Thermometer für eine Genauigkeit von 0,0001% in eine Tiefe von 15 Durchmessern eintauchen.



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
Browerstraße 39
36039 Fulda
Internet: www.klasmeier.com
Mail: info@klasmeier.com

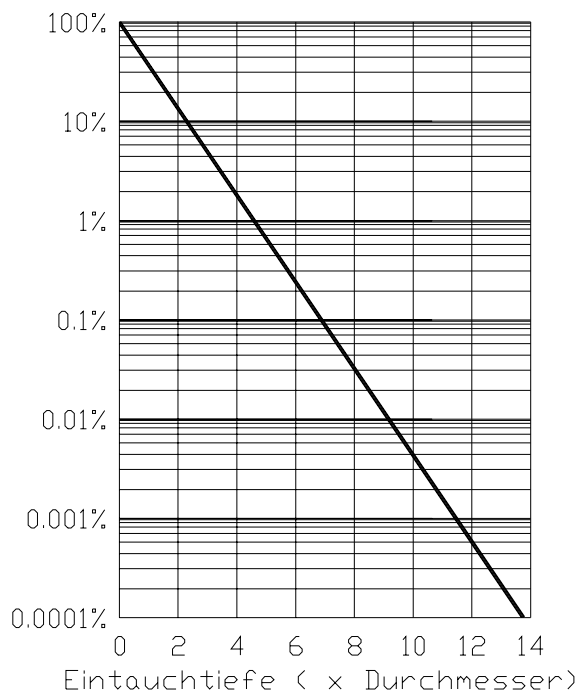


Bild 2. Relativer Temperaturfehler $[\Delta T_m / (T_{sys} - T_{amb})]$ aufgetragen gegen die Thermometer-Eintauchtiefe in Durchmessern, wenn $D_{eff} / D = 1$ ist. Diese Verhältnisse findet man in umgewälzten Flüssigkeitsbädern.

Die angegebenen Eintauchtiefen sind ausreichend für eine Thermoelement-Verbindung oder dünne Thermistoren. Für einen Fühler, der einen Pt100-Meßwiderstand beinhaltet, muß die Länge des benutzten Meßwiderstandes zur Eintauchtiefe hinzugerechnet werden, denn kein Anteil des Meßwiderstandes sollte im Bereich des Wärmeleitungsgradienten liegen.

Industrielle Thermometrie

Mit den so ermittelten Eintauchtiefen sind die meisten Anwendungen bis zu einer Temperatur von 500°C abgedeckt. Ein typisches Beispiel einer industriellen Anwendung ist der Einsatz eines Thermoelements in einem Schutzrohr. Ein Schutzrohr wird entweder verwendet, um das Thermometer vor dem Prozeßmedium zu schützen oder um das Medium abzudichten. Das Schutzrohr kann in den Prozeßaufbau eingeschraubt oder –geschweißt sein. Üblicherweise beträgt das Verhältnis von Durchmesser zu Länge 1:5 oder mehr. Bei der Ermittlung der Eintauchtiefe ist es notwendig, den Außendurchmesser der Installation heranzuziehen,



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
 Browerstraße 39
 36039 Fulda
 Internet: www.klasmeier.com
 Mail: info@klasmeier.com

also den Schutzrohrdurchmesser, und nicht den Durchmesser des Fühlers im Schutzrohr.

Ein anderes Beispiel sind Metallblockkalibratoren, die üblicherweise einen Metalleinsatz mit verschiedenen Bohrungen haben, um die zu kalibrierenden Thermometer aufzunehmen. Wieder ist der Durchmesser des Einsatzes maßgeblich, nicht der des Thermometers. Solche Einsätze besitzen üblicherweise einen Durchmesser von 50mm und sind im günstigsten Fall 250mm lang, da dies dem obengenannten Verhältnis von 1:5 entspricht. Normalerweise wird die Temperatur am Boden des Einsatzes mit etwa 1% Genauigkeit geregelt. Während allerdings die radiale Verteilung der Temperatur ausreichend gleichmäßig ist, wird der axiale Gradient häufig zu wenig kontrolliert. Unabhängig vom Durchmesser des Temperaturfühlers werden hier fehlerhafte Eintauchtiefen dadurch verursacht, daß der Einsatz nicht genügend tief eintaucht. Diese Fehler können größtenteils vernachlässigt werden, wenn

- neben dem Regelthermometer ein unabhängiges Referenzthermometer exakt dort in den Einsatz gegeben wird, wo sich in gleicher Eintauchtiefe auch das zu kalibrierende Thermometer befindet, und wenn
- das Referenzthermometer dem zu kalibrierenden Thermometer in Konstruktion und thermodynamischem Verhalten soweit wie möglich gleicht.

Diese Anordnung von Referenzthermometer und zu kalibrierendem Thermometer ist auch (implizite) Anforderung der DIN EN ISO 9000ff. Hier wird die Rückführung der Prüftechnik durch Kalibrierung mit einem höherstehenden Normal verlangt. Dies ist nur in einem thermischen Gleichgewicht möglich.



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
Browerstraße 39
36039 Fulda
Internet: www.klasmeier.com
Mail: info@klasmeier.com

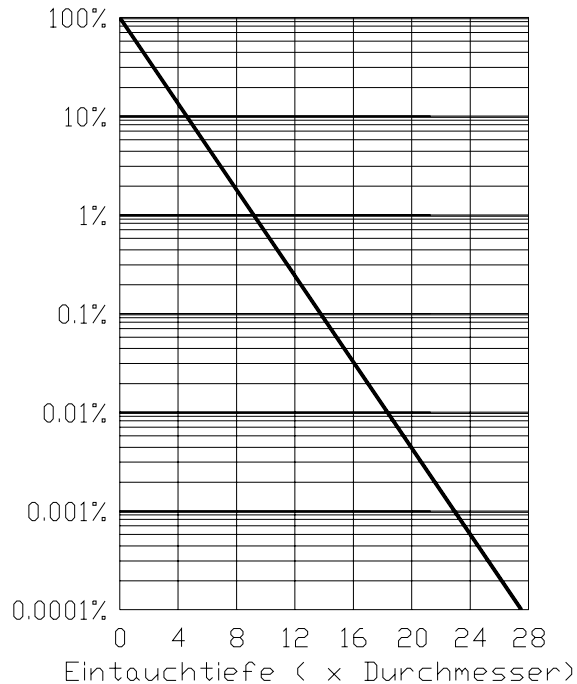


Bild 3. Relativer Temperaturfehler $[\Delta T_m / (T_{sys} - T_{amb})]$ aufgetragen gegen die Thermometer-Eintauchtiefe in Durchmessern, wenn $D_{eff}/D = 2$ ist. Diese Verhältnisse findet man in Metallblockkalibratoren.

Ermittlung der richtigen Eintauchtiefe

Fühler in Schutzrohren oder Metallkalibratoren arbeiten nicht in der gleichen Weise wie Fühler in umgewälzten Flüssigkeitsbädern. Der Grund ist, daß in umgewälzten Bädern $D_{eff}/D_{actual} = 1$ ist. In Situationen, wo es wie in Schutzrohren oder Metallblöcken einen Luftspalt gibt, ist $D_{eff}/D_{actual} > 1$.

Beispielsweise soll ein Thermoelement mit einem Durchmesser von 6mm in einem Metallblockkalibrator bei einer Temperatur, die 500°C über der Umgebungstemperatur liegt, kalibriert werden. Die gewünschte Genauigkeit sei 0,1% bezogen auf die Kalibriertemperatur 0,5°C.

Aus Bild 2 ergibt sich für $D_{eff} = 1$ eine Mindesteintauchtiefe des 7-fachen Durchmesser (42mm). Für $D_{eff} = 2D$, das sich aus eigenen Messungen als richtigeres Verhältnis ergeben hat, erhöht sich diese auf 84mm (Bild3). Für industrielle Platin-Widerstandsthermometer müssen rund 40mm für das Meßelement hinzugerechnet werden, was 120mm ergibt. Da die Meßunsicherheit bei Platin-Widerstandsthermometern manchmal noch geringer als bei Thermopaaren sein soll (z.B. 0,05°C), sollten nochmals 25mm addiert werden. Das ergibt eine Gesamteintauchtiefe von 145mm.



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
 Browerstraße 39
 36039 Fulda
 Internet: www.klasmeier.com
 Mail: info@klasmeier.com

Untersuchungen von Metallblockkalibratoren der Klasmeier Kalibrier- und Meßtechnik GmbH, Fulda, bei verschiedenen Temperaturen (250, 450 und 650°C) habe ergeben, daß bei einer Genauigkeit von 0,5°C unabhängig von der Temperatur für ein 6mm-TypN-Thermopaar mit einer Bohrung von 6,5mm Durchmesser eine Eintauchtiefe von 80mm notwendig ist, um den Quotienten aus Wärmeableitung und vertikalem Temperaturprofil des Metalleinsatzes kleiner als 0,5°C werden zu lassen (Bild 4). Das bestätigt die Annahme von $D_{\text{eff}}/D = 2$. Bild 2 soll für umgewälzte Flüssigkeitsbäder, Bild 3 für Metallblockbäder mit kleinen Luftspalten angewandt werden.

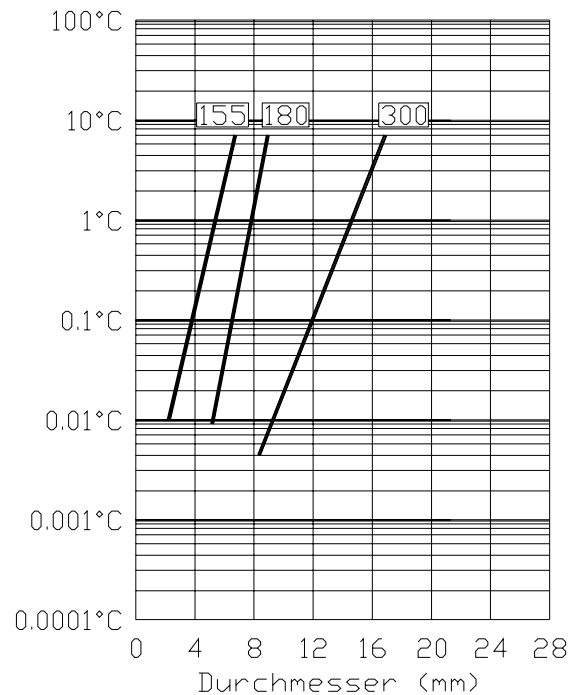


Bild 4. Wärmeableitfehler eines typischen Thermopaars für 155mm, 180mm und 300mm Eintauchtiefe in einem Ofen bei 500°C und darüber.

Gute Laborpraxis

Für Laborthermometer ist eine größere Meßgenauigkeit erforderlich. Als Beispiel dient die Ermittlung der Mindesteintauchtiefe für ein Thermometer mit einem Schutzrohr von 4mm Durchmesser, wobei das Meßelement in den letzten 40mm des Schutzrohres untergebracht ist. Die Messung sollte einen Eintauchfehler von weniger als 0,01°C bei Temperaturen bis zu 100°C haben. Zuerst ermittelt man die relative Unsicherheit der Messung als:



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
 Browerstraße 39
 36039 Fulda
 Internet: www.klasmeier.com
 Mail: info@klasmeier.com

$$\left| \frac{\Delta T_m}{T_{\text{sys}} - T_{\text{amb}}} \right| = \frac{0.5}{500} \approx 0.1\%$$

Die Mindesteintauchtiefe beträgt etwas mehr als das 9-fache des Durchmessers. Um sicherzugehen, taucht man das Thermometer in die Tiefe des 10-fachen Durchmessers oberhalb des Meßelements ein, im Beispiel also 80mm. Damit läßt sich eine Genauigkeit von ungefähr $\pm 0,01\%$ erreichen. Mit dem 5-fachen Durchmesser erzielt man eine Genauigkeit von etwa $\pm 1\%$, was für die industrielle Thermometrie ausreichend ist.

Beste Laborpraxis

Genaueste Labormessungen werden z.B. mit Normal-Platin-Widerstandsthermometern (NPWTH) in Fixpunktzellen durchgeführt. Dabei ist das Thermometer in das Metall der Fixpunktzelle nur 160mm bis 200mm eingetaucht, obwohl eigentlich eine Eintauchtiefe von etwa 300mm erforderlich ist. Der Grund dafür ist, daß der Temperaturgradient oberhalb und innerhalb von 200mm Zellenlänge typischerweise $0,5^\circ\text{C}$ der Zellentemperatur beträgt (Bild5). Außerdem ist der Bereich darüber gegen Wärmeleitung und Wärmestrahlung mit Strahlungsschildern isoliert. Das reduziert den Temperaturgradienten und damit die erforderliche Eintauchtiefe.

Im Bild 1.1 ermitteln wir für $D_{\text{eff}} = 1$ eine Mindest-Eintauchtiefe von 7 x Durchmesser oder 42mm. Jedoch, wenn $D_{\text{eff}} = 2D$ ist, würde diese auf 84mm erhöht werden.

Als Rechenbeispiel hierfür dient eine Zinkzelle, die das Eintauchen von 200mm unterhalb der Oberfläche des reinen Zinkmaterials erlaubt. Die Fest-Flüssig-Gleichgewichtstemperatur, bei der die Messungen gemacht werden, sei 419°C .

Da das Thermometer einen Luftspalt hat, wird zur Ermittlung der korrekten Eintauchtiefe Bild 3 herangezogen: Wenn der Fehler in der Temperaturanzeige $T_m = 0,0001^\circ\text{C}$ sein soll, ergibt sich zuzüglich eine Eintauchtiefe des 32-fachen Durchmessers.

Für eine Länge von 200mm beträgt der Temperaturgradient längs des Thermometers nur $0,5^\circ\text{C}$. Für die Messungen genügt dann gemäß $0,0001^\circ\text{C}/0,5^\circ\text{C} = 0,0002\%$ bzw. der 15-fache Durchmesser zuzüglich der Länge des Meßwiderstands. Für ein NPWTH mit einem Durchmesser von 8mm bedeutet das eine Eintauchtiefe von 120mm zuzüglich 50mm Meßwiderstandslänge. Das heißt, daß in der Zelle nur 170mm, also eine um 130mm verminderte Eintauchtiefe notwendig ist.



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
 Browerstraße 39
 36039 Fulda
 Internet: www.klasmeier.com
 Mail: info@klasmeier.com

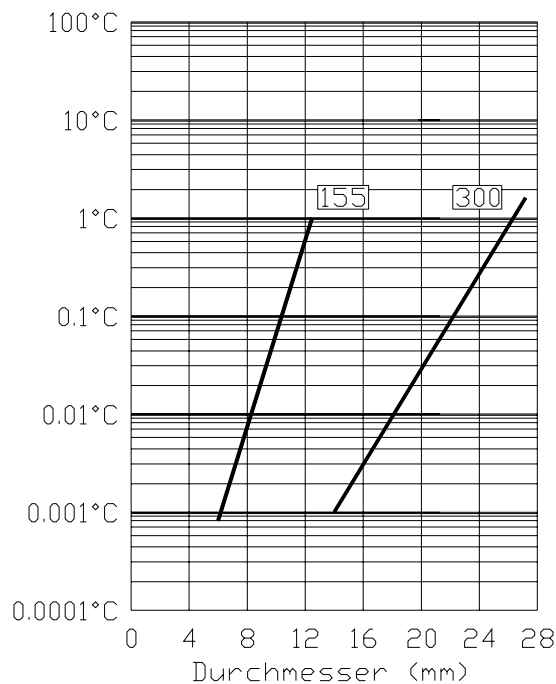


Bild 5. Wärmeableitfehler eines typischen Platin-Widerstandsthermometers mit 30mm aktiver Länge bei 300°C für 155mm und 300mm totale Eintauchtiefe in einem umgewälzten Flüssigkeitsbad.

Wirkungsweise von Komponenten

Metalleinsätze, Wärme-Isolierstücke oder Lufträume oberhalb des Einsatzes in Metallblockkalibratoren könne die erforderliche Eintauchtiefe verändern. Wenn sich der Einsatz unter der Oberkante der Heizwicklung des Metallblockkalibrators befindet, zeigt ein darin befindliches Thermometer nicht die gleichen Wärmeableitungseffekte wie ein Thermometer, das direkt den Übergang zur Umgebungstemperatur hat. Temperaturfühler in solchen Metalleinsätzen haben Wärmeableitungsprobleme nur in dem Bereich, wo sie das Kalibriersystem verlassen.

Der Standard-Eintauchtest, bei dem man den Fühler um ein oder zwei Durchmesser herauszieht und eine etwaige Veränderung der Temperatur überprüft, bestätigt die Richtigkeit der mit der beschriebenen Methode gewählten Eintauchtiefe.

Literatur

- 1 Bureau International des Poids et Mesures, Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990. Pavillon de Breteuil 1990, Kapitel 3.2.4
- 2 Nicholas, J.V., White, D.R.: Traceable Temperatures. Wiley & Sons, Chichester – New York



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
 Browerstraße 39
 36039 Fulda
 Internet: www.klasmeier.com
 Mail: info@klasmeier.com

Der Autor dieses Beitrages

Peter Klasmeier, geb. 1950, studierte Maschinenbau an der Fachhochschule Darmstadt. Danach war er Konstrukteur und später Produktbereichsleiter bei Jumo in Fulda. Heute ist er Geschäftsführer der Klasmeier Kalibrier- und Meßtechnik GmbH, Fulda.



Klasmeier Kalibrier- und Messtechnik GmbH
Browerstraße 39
36039 Fulda
Internet: www.klasmeier.com
Mail: info@klasmeier.com