

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

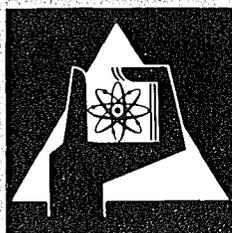
Dezember 1973

KFK 1876

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

**Anwendung des Wärmerohrprinzips zur Vermeidung des Fehlers
durch den herausragenden Faden an Flüssigkeitsthermometern**

F.E. Reiß



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1876

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Anwendung des Wärmerohrprinzips zur Vermeidung des Fehlers
durch den herausragenden Faden an Flüssigkeitsthermometern

F.E. Reiß

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Fehler durch den herausragenden Faden an Flüssigkeitsthermometern kann vermieden werden, wenn man die Ausdehnungskapillare des Thermometers mit einem Wärmerohr auf die Temperatur des zu messenden Bades aufheizt. Experimentelle Untersuchungen zeigen, daß bei richtiger Auslegung vollständige Fehlerkompensation erreicht werden kann.

Application of the Heat Pipe Principle to Avoid the Error
Due to the Emergent Stem in Liquid-in-Glass Thermometers

Abstract

The error due to the emergent stem with liquid-in-glass thermometers can be avoided by heating the capillary of the thermometer with a heat pipe to the temperature of the bath. Experimental investigations show that full compensation of the error can be achieved by proper design.

Inhalt

	<u>Seite</u>
1. <u>Einleitung</u>	1
2. <u>Der Fehler durch den herausragenden Faden</u>	
2.1. Ursache; Meßanordnungen ohne diesen Fehler	1
2.2. Meßanordnungen mit Fehler durch den herausragenden Faden	
2.2.1. Zwei Zahlenbeispiele für die Fehlergröße	2
2.2.2. Bisher bekannte Wege, den aufgetretenen Fehler zu korrigieren	3
3. <u>Das mittels Wärmerohr temperierte Flüssigkeitsthermometer</u>	
3.1. Prinzip des wärmerohrtemperierten Flüssigkeitsthermometers	6
3.2. Das Wärmerohr	6
3.3. Gestaltungsrichtlinien	7
3.4. Beispiel zum erforderlichen Grad der Isothermie; notwendige Wärmeleistungen	8
3.5. Vorteile des wärmerohrtemperierten Flüssigkeitsthermometer	9
3.6. Grenzen der Anwendbarkeit	10
4. <u>Mögliche Ausführungsformen wärmerohrtemperierter Flüssigkeitsthermometer</u>	11
5. <u>Versuche mit wärmerohrtemperierten Flüssigkeitsthermometern</u>	
5.1. Thermometer mit Wasserwärmerohr	13
5.2. Thermometer mit Diphenyläther-Wärmerohr	15
6. <u>Literaturverzeichnis</u>	19
7. <u>Abbildungen</u>	20

1. Einleitung

Die Temperaturmessung mit Flüssigkeitsthermometern ist ein lange bekanntes und verbreitetes Meßverfahren. Für genaue Messungen muß dabei der von der Thermometerskala abgelesene Temperaturwert um den Einfluß verschiedener Effekte korrigiert werden. Nach /1/ sind die wesentlichsten Störeinflüsse wechselnde Neigung des Thermometers, wechselnder Außendruck, die Depression des Nullpunkts, die auch bei gut gealterten Thermometergläsern auftritt und vor allem der Fehler durch den herausragenden Faden, der erhebliche Beträge annehmen kann, vgl. Abschnitt 2.2.1.

In der vorliegenden Arbeit werden kurz Ursache, Größe und bisher bekannte Korrekturverfahren für den Fehler durch den herausragenden Faden beschrieben. Dann wird vorgeschlagen, den Fehler durch den herausragenden Faden dadurch zu vermeiden, daß man die Thermometerkapillare mittels eines Wärmerohres auf die Temperatur des zu messenden Bades aufheizt. Über konstruktive Überlegungen und dazu ausgeführte Experimente wird berichtet.

2. Der Fehler durch den herausragenden Faden

2.1. Ursache; Meßanordnungen ohne diesen Fehler

Die Skalen der meisten Thermometer sind für den Fall geteilt, daß das Flüssigkeitsvorrats- oder Thermometergefäß und der Flüssigkeitsfaden in der Ausdehnungskapillaren die gleiche Temperatur haben /1, 2/. Hat der aus dem Bad herausragende Faden eine niedrigere Temperatur als das Thermometergefäß, so ziehen sich wegen der Wärmedehnung der Faden, die Ausdehnungskapillare und die Thermometerskala etwas zusammen. Da infolge des Festkörpers gegen-

über hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Thermometerflüssigkeit die Fadenlänge stärker abnimmt als die Skalenlänge, zeigt das Thermometer eine zu niedrige Temperatur an. Für Messungen in kalte Gebiete hinein gilt sinngemäß das umgekehrte.

Für die praktische Durchführung der Messung bedeutet das, daß das Thermometer bis über die Ablesestelle hinaus in ein temperaturkonstantes Bad eintauchen soll. Bei der Länge üblicher Thermometer ist das nicht immer möglich. Auch die Verwendung von Thermometern mit abgekürzter Skala (sog. J.G.-Thermometer mit einem Meßbereichsumfang von nur 10-20°C) bringt nicht immer Abhilfe, weil entweder der Raumbereich, dessen Temperatur ermittelt werden soll, zu klein ist, um das Thermometer bis über die Ablesestelle aufzunehmen oder weil die eingetauchte Ablesestelle nicht abgelesen werden kann, etwa in undurchsichtigen Schmelzen oder Lösungen oder in Öfen, Autoklaven usf.

2.2. Meßanordnungen mit Fehler durch den herausragenden Faden

2.2.1. Zwei Zahlenbeispiele für die Fehlergröße

Nach dem oben gesagten ergibt es sich verhältnismäßig häufig, daß mit herausragendem Faden gemessen werden muß. Die Größe des Fehlers, der dabei entstehen kann, und seine Auswirkung auf die Genauigkeit der Temperaturmessung wird an zwei Beispielen gezeigt.

Die Temperatur eines Flüssigkeitsbades, das auf etwa 100°C gehalten wurde, wurde mit einem Centigrade-Normal-Quecksilberthermometer aus Jenaer Normalthermometerglas 16^{III} gemessen. Das Thermometer war etwa 50cm lang, die von 0-100°C reichende Skala war in 1/10°C unterteilt, die Ablesung von 0,02°C ist möglich. Das Thermometer tauchte

etwa 7cm in das Bad, die Korrektur für den herausragenden Faden bei einer Temperatur von etwa 100°C haben wir zu $+(0,80 \pm 0,10)^{\circ}\text{C}$ bestimmt durch Vergleich mit der Anzeige eines baugleichen korrekt eingetauchten Thermometers und durch Messung des Wassersiedepunktes. Beim Vergleich der beiden Thermometer wurde die zwischen ihnen bestehende Skalenabweichung berücksichtigt. Die im Vergleich zur möglichen Ablesegenauigkeit hohe Unsicherheit des Korrekturbetrages rührt von den zeitlichen Schwankungen des Temperaturfeldes her, in dem sich der herausragende Faden befindet. Eine Korrektur der Temperaturrohablesung von der angegebenen Größe muß für genaue Messungen unbedingt angebracht werden. Da die Korrektur aber nur mit großer Unsicherheit zu bestimmen ist, geht die an sich mögliche Meßgenauigkeit verloren.

Als zweites Beispiel werden die in /2/ angegebenen Zahlen zitiert. Dort wird die Temperatur eines Aluminiumblocks durch Einstecken eines der üblichen bis 360°C reichenden Quecksilberthermometer in eine 100 mm tiefe Bohrung des Blocks gemessen. Bei einer am Thermometer abgelesenen Temperatur von 360°C und einer mittleren Temperatur des herausragenden Fadens von 60°C wird eine Korrektur von $+12,25^{\circ}\text{C}$ errechnet. Der Betrag dieser Korrektur ist so groß, daß der unkorrigierte Meßwert schon bei geringen Genauigkeitsanforderungen praktisch unbrauchbar ist.

2.2.2. Bisher bekannte Wege, den aufgetretenen Fehler zu korrigieren

Die angeführten Beispiele zeigen, daß die Korrektur für den herausragenden Faden bei auch nur einigermaßen genauen Messungen angebracht werden muß. Die Korrektur wurde bisher auf verschiedene Weisen vorgenommen /1, 2/.

Bei Thermometern, bei denen sich der herausragende Faden stets in demselben bekannten und zeitlich konstanten Temperaturfeld befindet, kann die Korrektur bereits bei der Anbringung der Skala mitberücksichtigt werden. Die Bedingungen, unter denen ein solches Thermometer richtig anzeigt, werden dabei auf der Rückseite der Skala vermerkt. Thermometer dieser Art kommen für einige technische Zwecke in Betracht.

Für die größte Zahl der Anwendungen sind jedoch die Eintauchtiefe des Thermometers und das Temperaturfeld, in dem sich der herausragende Faden befindet, von Meßaufgabe zu Meßaufgabe verschieden und für eine feste Anordnung oft zeitabhängig.

Manchmal ist es möglich, den Betrag der Korrektur durch Kontrollmessung mit einem vorschriftsmäßig eingetauchten Faden zu ermitteln. Meist scheidet diese Möglichkeit aus, da man ja sonst eben die richtig anzeigende, eingetauchte Anordnung verwenden würde. Manchmal wird sich zur Ermittlung der Korrektur auch mit Temperaturwerten vergleichen lassen, die durch andere Temperaturmeßgeräte als Flüssigkeitsthermometer gewonnen wurden, oder man benutzt passend liegende Fixpunkte.

In der überwiegenden Anzahl der Fälle wird man auf eine Berechnung des Korrekturbetrages Δ nach der bekannten Korrekturformel angewiesen sein /1, 2/.

$$\Delta = k \cdot a (t - t_0)$$

k ist dabei eine von der Art der Thermometerflüssigkeit und des Thermometerglases abhängige Materialkonstante, die tabelliert ist, a ist die Länge des herausragenden Flüssigkeitsfadens (gemessen in Grad der Skalenteilung), t ist die abgelesene Temperatur, t_0 die mittlere Temperatur des herausragenden Fadens. Man sieht leicht, daß der Korrekturbetrag

betrag Δ für den Grenzfall $a \approx t$, $t \gg t_0$ mit dem Quadrat der abgelesenen Temperatur wächst.

Die mittlere Temperatur t_0 des herausragenden Fadens wird oft durch Schätzung bestimmt oder mit mehreren kleinen Hilfsthermometern, deren Gefäße man neben dem herausragenden Faden anordnet. Am sichersten läßt sich die mittlere Fadentemperatur mit einem Fadenthermometer bestimmen. Das ist ein Thermometer mit einem langgestreckten Gefäß, das möglichst denselben inneren und äußeren Durchmesser hat wie die Kapillare des Hauptthermometers. Das Fadenthermometer wird neben dem Hauptthermometer so in das Bad gesteckt, daß es noch einige Zentimeter in die Badflüssigkeit eintaucht und sich das obere Ende seines Gefäßes in der Höhe der Ablesestelle befindet. Das Fadenthermometer zeigt dann die mittlere Temperatur eines Fadens an, der genauso lang ist wie der des Hauptthermometers und von dem sich ein Teil noch in der Badflüssigkeit befindet. Mit einem vorgegebenen Fadenthermometer läßt sich die mittlere Fadentemperatur nur innerhalb eines gewissen Bereichs der Lage der Ablesestelle im Hauptthermometer bestimmen, da das Fadenthermometer einerseits nicht zu tief in das Bad tauchen darf, andererseits aber unbedingt einige Zentimeter eintauchen muß. Handelsüblich sind Fadenthermometer mit 100 mm und mit 200 mm Gefäßlänge. Auch das Fadenthermometer läßt nur eine angenäherte Bestimmung der mittleren Fadentemperatur zu. Das gilt besonders für große Längen des herausragenden Fadens.

3. Das mittels Wärmerohr temperierte Flüssigkeitsthermometer

3.1. Prinzip des wärmerohrtemperierten Flüssigkeitsthermometers

Das in dieser Arbeit vorgeschlagene und experimentell durchgeführte Verfahren zur Beseitigung des Fehlers durch den herausragenden Faden an Flüssigkeitsthermometern beruht darauf, die Thermometerkapillare unter Verwendung eines Wärmerohres auf die Temperatur des Thermometergefäßes bzw. die Temperatur des zu messenden Bades aufzuheizen /3/.

Eine solche Anordnung bringt unabhängig von der Länge des Fadens, d.h. von der Lage des Meniskus in der Ausdehnungskapillaren und unabhängig vom äußeren Temperaturfeld dieselbe Wirkung hervor, als ob das Thermometer bis über die Ablesestelle in ein konstant temperiertes Bad mit der Temperatur des Ausdehnungsgefäßes eintauchen würde. In einem solchen Fall entfällt jede Korrektur für den herausragenden Faden.

3.2. Das Wärmerohr

In diesem Abschnitt werden kurz die Eigenschaften des Wärmerohres dargestellt, soweit sie für die vorliegende Arbeit wichtig sind. Weitere Einzelheiten und Literatur finden sich z.B. in /4, 5/.

Ein Wärmerohr ist eine kontinuierlich arbeitende Wärmetransporteinrichtung mit einem allseitig geschlossenen Arbeitsgefäß, in dem als Wärmeübertragungsmedium eine kleine Menge überall an den Wänden verteilter Flüssigkeit eingeschlossen ist, Befindet sich die Wand des Wärmerohres nicht an allen Stellen auf gleicher Temperatur, so wird an den heißeren Wandteilen Flüssigkeit verdampfen,

wobei der Wand die Verdampfungsenthalpie entzogen wird; wegen des Dampfdruckunterschiedes über heißen und kalten Wandteilen strömt der Dampf zu den kälteren Wandteilen und kondensiert dort teilweise unter Abgabe seiner Verdampfungsenthalpie, die somit vom Verdampfer zum Kondensator befördert wird. Für das Wärmerohr ist kennzeichnend, daß der Rücktransport des Kondensats zum Verdampfer durch Oberflächenkräfte auch gegen äußere Kräfte erfolgen kann. Ein Kapillärwärmerohr benötigt zum Betrieb keine Hilfsenergie.

Es ist bekannt, daß ein Wärmerohr innerhalb seines im wesentlichen vom Dampfdruck der Arbeitsflüssigkeit bestimmten Arbeitsbereiches auf seiner ganzen Oberfläche nahezu isotherm ist. Die Isothermie ist umso besser, je weniger Wärme transportiert werden muß.

3.3. Gestaltungsrichtlinien

Aus dem beabsichtigten Ziel und den Eigenschaften des Wärmerohres leuchtet ein, daß ein wärmerohrtemperiertes Flüssigkeitsthermometer folgende Kennzeichen haben sollte:

- 1) Das Wärmerohr muß sich mit seinem Wärme aufnehmenden Teil (dem Verdampfer) in der Nähe des Ausdehnungsgefäßes des Thermometers befinden, damit das Wärmerohr dieselbe Temperatur annimmt wie das Ausdehnungsgefäß.
- 2) Das Wärmerohr muß mit seinem Wärme abgebenden Teil (dem Kondensator) mit der Ausdehnungskapillaren des Thermometers in deren ganzer Länge in gutem Wärmekontakt sein, damit diese überall die Temperatur des Ausdehnungsgefäßes bzw. des Bades annimmt.
- 3) Durch ausreichende Wärmeisolierung ist dafür zu sorgen, daß die vom Wärmerohr transportierte Gesamtleistung so klein bleibt, daß gute Isothermie längs des Wärmerohres erreicht wird.

3.4. Beispiel zum erforderlichen Grad der Isothermie; notwendige Wärmeleistungen

In Abschnitt 2.2.1. wurde der experimentell von uns an einer bestimmten Thermometeranordnung ermittelte Anzeigefehler Δ infolge des herausragenden Fadens mit $0,8^{\circ}\text{C}$ angegeben. Mit der in Abschnitt 2.2.2. angegebenen Gleichung und der aus /1/ entnommenen Konstanten $k=0,000157 \text{ Grad}^{-1}$ errechnet sich für 100 herausragende Skalenteile eine mittlere Fadentemperatur von $t_0 \approx 50^{\circ}\text{C}$. Man kann nun fragen, auf welchen Wert man die mittlere Fadentemperatur t_0 anheben müßte, um den Anzeigefehler Δ durch den herausragenden Faden kleiner zu machen als die nach Abschnitt 2.2.1. mögliche Ablesegenauigkeit von $0,02^{\circ}\text{C}$. Man erhält für diesen Fall mit der angegebenen Gleichung bei einer zu messenden Temperatur von 100°C für die mittlere Fadentemperatur den Wert $t_0 \approx 98,8^{\circ}\text{C}$. Nimmt man einen linearen Temperaturverlauf im Faden an, so sieht man, daß bis zu einem Temperaturabfall von $2,4^{\circ}\text{C}$ längs des Fadens der Fehler durch den herausragenden Faden kleiner bleibt als die Ablesegenauigkeit des Thermometers, der Fehler also das Meßergebnis noch nicht merkbar beeinflußt. Da die nachfolgende Abschätzung über die erforderlichen Wärmeleistungen nur kleine Zahlen ergibt, scheint es ohne weiteres möglich, Wärmerohre zu bauen, deren Temperaturabfall längs des Fadens erheblich kleiner ist als der als Grenze abgeschätzte.

Mit den in /6/ angegebenen Werten der Wärmeübergangszahlen für freie Konvektion und Strahlung für senkrechte Rohre in Luft schätzt man für ein Rohr von $10\text{mm } \phi$ und 40cm Länge und eine Rohrwandtemperatur von 100°C eine Gesamtwärmeverlustleistung von etwa 15W ab. Die gewählten Abmessungen treffen in etwa die im experimentellen Teil beschriebenen Anordnungen. Einer Wärmeleistung von 15W entspricht, wenn das Wärmerohr Wasser als Betriebsmittel enthält, ein Massenfluß von $0,4\text{g}$ pro Minute. Ist für das zu messende Bad der Wärmeentzug von 15W zu hoch oder arbeitet das Wärmerohr bei diesem Wärmefluß nicht innerhalb der einzuhaltenden

Temperaturgrenzen isotherm, so kann man das den Faden temperierende Wärmerohr durch einen Vakuummantel vom Thermometerhüllrohr isolieren. In diesem Fall kann die Wärmeleistung auf 1 W absinken. Die Anwendung der bekannten Isoliermaßnahmen (Strahlschirme, Isolierpackungen, Verwendung schlechter Wärmeleiter und kleiner wärmeleitender Querschnitte usf.) kann diese Leistung weiter vermindern.

3.5. Vorteile des wärmerohrtemperierten Flüssigkeitsthermometers

Da beim wärmerohrtemperierten Flüssigkeitsthermometer kein mit Unsicherheit behaftetes Korrekturglied ermittelt zu werden braucht, kann die Anzeigegenauigkeit des verwendeten Thermometers voll ausgenutzt werden. Das führt zu genaueren Temperaturwerten als die bisher bekannten Korrekturverfahren. Der vom Thermometer abgelesene Meßwert ist direkt der korrekte gesuchte Temperaturwert (Abweichungen der Thermometerskala gegen die Internationale Temperaturskala müssen ggf. berücksichtigt werden).

Das Thermometer läßt sich auch mit angebrachtem Fadentemperierwärmerohr mit eingetauchter Ablesestelle betreiben. Das ermöglicht eine sehr einfache Kontrolle auf vollständige Fehlerkompensation durch verändern der Eintauchtiefe.

Die Anforderungen an die verwendeten Wärmerohre sind nicht hoch, weil die benötigten Gesamtwärmeleistungen klein sind und weil längs des Wärmerohres ein verhältnismäßig großer Temperaturabfall erlaubt ist. Wird das Wärmerohr länger ausgeführt als der abzulesende Faden, braucht ein Gaspolster im Wärmerohr nicht zu stören. Weiter wird man die Betriebslage des Wärmerohres oft so wählen können, daß es senkrecht steht und das Kondensat durch die Schwerkraft zum Verdampfer zurückgefördert wird.

Das wärmerohrtemperierte Thermometer braucht ebensowenig wie seine Komponenten zum Betrieb externe Hilfsenergie.

3.6. Grenzen der Anwendbarkeit

Wie immer bei der Anwendung von Wärmerohren muß die Arbeitsflüssigkeit des Wärmerohres mit allen von ihr erreichbaren Materialien der Anordnung verträglich sein. Weiter muß bei den vorgesehenen Benutzungstemperaturen der Dampfdruck der Arbeitsflüssigkeit mindestens einige Torr betragen, darf aber andererseits nicht so hoch steigen, daß die Wärmerohrhülle zerstört wird.

Falls die Thermometerkapillare und/oder das Ausdehnungsgefäß dem Druck des Wärmerohr Arbeitsmittels ausgesetzt sind, müssen diese Teile so stark ausgebildet werden, daß der durch den wechselnden Dampfdruck verursachte Fehler infolge elastischer Volumenänderung insbesondere des Ausdehnungsgefäßes kleiner bleibt als eine vorgegebene Schranke, oder man muß für diesen Effekt eine Korrektur anbringen. Bei üblichen Quecksilberthermometern beträgt der Druckkoeffizient etwa $-0,1^{\circ}\text{C/at} /1/$.

Bei der Anwendung eines nach dem Vorschlag dieser Arbeit gestalteten Thermometers darf das Wärmerohr nirgends Kontakt mit einem Wärmereservoir haben, das wärmer ist als das Thermometergefäß. Das Wärmerohr hat eine starke Tendenz, seine gesamte Oberfläche auf die Temperatur der heißesten Oberflächenstelle zu bringen. Das kann immer erreicht werden wenn die an die heißeste Oberflächenstelle angekoppelte Wärmequelle imstande ist, die zur Isothermisierung nötige Wärmemenge ohne wesentlichen Temperaturverlust zu liefern. Heizt man also bei einem wärmerohrtemperierten Thermometer das Wärmerohr in Höhe der Ausdehnungskapillaren an, so werden Verdampfer und Kondensator ihre Plätze tauschen und es

wird das Ausdehnungsgefäß über die Temperatur seiner Umgebung (seines Bades) hinaus aufgeheizt. Isoliert man das Ausdehnungsgefäß thermisch vom Wärmerohr durch einen Vakuumraum oder durch einen schlecht wärmeleitenden Propf, so geht immerhin noch die richtige Temperierung des Fadens verloren. Die Auswirkung dieser Eigenart kann gemildert werden, indem man das Einströmen von Wärme in das Wärmerohr an nicht erwünschten Stellen durch Isoliermaßnahmen erschwert.

4. Mögliche Ausführungsformen wärmerohrtemperierter Flüssigkeitsthermometer

In Abb.1 werden verschiedene Ausbildungsweisen der im zu messenden Bad befindlichen Thermometergefäß-Wärmerohrverdampfer-Region dargestellt.

Abb.1a zeigt Wärmerohrverdampfergefäß und Ausdehnungsgefäß nebeneinander angeordnet. Das Wärmerohr ist in üblicher Weise mit Kapillarstruktur ausgekleidet.

Abb.1b zeigt das Wärmerohrverdampfergefäß über dem Thermometergefäß angeordnet. Diese Bauweise gleicht der üblicher Einschlußthermometer.

Abb.1c zeigt eine konzentrische Anordnung, wobei das Wärmerohr außen liegt. In diesem Fall kann das Thermometergefäß leicht als Kapillare weitergeführt werden. Das Wärmerohr temperiert hier auch das Ausdehnungsgefäß selbst.

Abb.2 zeigt einige Ausführungsformen des temperierten Thermometers in der Region, in der sich Skala und Ablesestelle befinden.

Abb.2a zeigt den einfachsten Fall des Einschlußthermometers *) , wobei das Einschlußrohr gleichzeitig als Gefäß für das temperierende Wärmerohr dient. Die Kapillarstruktur ist in einem Streifen parallel zur Ausdehnungskapillaren unterbrochen, um den Durchblick auf die Skala und den Fadenmeniskus in der Ausdehnungskapillaren zu ermöglichen. Dabei soll die innere Oberfläche des Hüllrohres dort, wo der Durchblick erwünscht ist, evtl. auch die Skala und die Ausdehnungskapillare, so behandelt werden, daß die Arbeitsflüssigkeit des Wärmerohres an dieser Stelle nicht in einzelnen Tröpfchen sondern als glatter, durchsichtiger Film kondensiert.

Abb.2b zeigt dieselbe Anordnung, jedoch ist das temperierende Wärmerohr vom Hüllrohr des Thermometers durch einen Vakuumsringpalt getrennt. Hinter der Skala ist ein Strahlschirm aus Aluminiumfolie in den Vakuumpalt eingeschoben.

Abb.2c zeigt eine Anordnung bei der sich die Ausdehnungskapillare nicht im Innern des temperierenden Wärmerohres befinden, sondern außen an der Wärmerohrwand. Das Wärmerohr nimmt hier etwa den halben Querschnitt des Hüllrohres ein, die Wärmerohrwand hinter der Ausdehnungskapillare trägt in üblicher Weise die Thermometerskala.

Abb.2d zeigt die Ausdehnungskapillare in einem einspringenden Winkel des temperierenden Wärmerohres, die Wände des Wärmerohres tragen die Skala; diese kann aber auch auf der Ausdehnungskapillare selbst angebracht sein.

Die Anordnungen nach Abbn.2c und 2d sind auch mit den in Abb.2b angedeuteten Isoliervorrichtungen möglich.

*) An Flüssigkeitsthermometern unterscheidet man zwei Bauarten: Das Stabthermometer, bei dem sich die Skaleneinteilung auf der (meist dickwandig ausgebildeten) Ausdehnungskapillaren befindet und das Einschlußthermometer, bei dem die ungraduierte Ausdehnungskapillare und die unterlegte Skala gemeinsam in ein Hüllrohr eingeschlossen sind.

Als Kapillarstruktur für das Wärmerohr kann irgendeine aus der großen Zahl bekannter Strukturen gewählt werden, bevorzugt eine solche aus losen Glasfasern, Glasfasergewebe, nahtlosem Glasfaserschlauch, Sinterglas, Schaumglas u.ä. Bei senkrechtem Betrieb mit untenliegendem Verdampfer, d.h. in der Normallage geeichter Thermometer, kann im Kondensator stellenweise oder ganz auf Kapillarstruktur verzichtet werden, bei hinreichend kleinen benötigten Wärmeleistungen auch im Verdampfer, wie die Versuche in Abschnitt 5 zeigen werden.

Abb.3 zeigt Anordnungen, bei denen Thermometergefäß und Wärmerohrverdampfer räumlich getrennt sind.

Abb.3a zeigt Thermometergefäß und Wärmerohrverdampfer beide an demselben Ende des Thermometers.

Abb.3b zeigt Thermometergefäß und Wärmerohrverdampfer an gegenüberliegenden Seiten des Thermometers.

5. Versuche mit wärmerohrtemperierten Flüssigkeitsthermometern

5.1. Thermometer mit Wasserwärmerohr

Nach dem in Abb.1b angegebenen Bauprinzip wurde unter Verwendung eines handelsüblichen Einschlußthermometers ein wärmerohrtemperiertes Thermometer aufgebaut. Das Einschlußthermometer trug eine von -10°C bis 100°C reichende Skala, die in $\frac{1}{5}^{\circ}\text{C}$ unterteilt war. Dieses Thermometer wurde, wie Abb.4 zeigt, in ein Glasrohr von 14mm Innendurchmesser und 2mm Wandstärke eingeschoben und durch einen, im Querschnitt in Abb.4 sichtbaren, nahtlosen Flechtschlauch aus verzinntem Kupferdraht an die Innenwand des Außenrohres gepreßt, so daß beiderseits der Berührungslinie schmale sichelförmige Be-

reiche entstehen. In diesen Zwickeln läuft der sonst undurchsichtige Tröpfchenbelag der Wärmerohrwand zu einer klar durchsichtigen Flüssigkeitsschicht zusammen. So kann die Skala sauber abgelesen werden. Nach Einschieben von etwas feinmaschigem Drahtgeflecht in der Verdampferregion wurde das Thermometer in seiner exzentrischen Lage so eingeklebt, daß das Quecksilbergefaß außerhalb des Wärmerohres in direktem Badkontakt blieb. Zum Kleben wurde elastisch härtender Silikonkitt, Marke Silastic 732 RTV der Firma Dow Corning, benutzt. Das im Bild nicht gezeigte obere Ende des Hüllrohres war mit einem Normalschliffglashahn versehen. Durch den Hahn wurde der Raum zwischen dem Thermometer und dem Hüllrohr mit etwa 2 ml destilliertem Wasser gefüllt und nach dem Evakuieren (wobei der Wasserverlust klein bleibt) vakuumdicht verschlossen.

Das eingebaute Thermometer war vorher mit einem anderen gleicher Bauart verglichen worden. Die in Abb.5 eingezeichneten Kreuze geben die temperaturabhängige Anzeigedifferenz im Anlieferungszustand wieder. Die Ablesegenauigkeit betrug etwa $\pm 0,02$ °C. Das Bild zeigt, daß das später temperierte Thermometer mit dem Vergleichsthermometer vor dem Umbau zwischen 55 °C und 85 °C praktisch übereinstimmt, bei größeren und bei kleineren Temperaturen innerhalb des untersuchten Bereichs jedoch bis zu 0,1 °C mehr anzeigt.

Das fertige Wärmerohrthermometer wurde in einem Thermostaten-Bad neben dem oben erwähnten Vergleichsthermometer, beide mit gleicher Eintauchtiefe bis zu etwa + 2 °C der Skala, betrieben. Dabei zeigte das Wärmerohrthermometer im ganzen untersuchten Bereich mehr an als das Vergleichsthermometer. Die ermittelten Temperaturdifferenzen sind als Kreise in Abb.5 eingetragen und durch eine Kurve verbunden. In der Gegend von 100 °C wurde der (barometerstandsabhängige) Wassersiedepunkt benutzt, um die Anzeige des temperierten Thermometers zu prüfen. Die Korrektur für den herausragenden Faden beträgt für das unveränderte Thermometer 0,45 °C bei 100 °C. Das ist auch genau der Betrag, um den das wärmerohrtemperierte Thermometer bei

100 °C mehr anzeigt als das Vergleichsthermometer. Bei dieser Temperatur ist also mit der vorgeschlagenen Einrichtung der Fehler durch den herausragenden Faden voll kompensiert.

Aus dem Verlauf der Kurve der Anzeigedifferenz zwischen wärmerohrtemperiertem und unbehandeltem Thermometer im unteren Temperaturbereich (bis etwa 65 °C) kann man schließen, daß das Wärmerohr erst ab etwa 70 °C genügend Wärme transportiert, um das Thermometer ausreichend zu temperieren.

Wegen des beträchtlichen Temperaturabfalls durch die Wärmeleitung in der Hüllrohrwand am Verdampfer war die Wärmerohrtemperatur deutlich kleiner als die vom Thermometer angezeigte Temperatur, genügte jedoch für die Ausschaltung des Fehlers durch den herausragenden Faden. Bei einer Wärmeleistungsdichte am Verdampfer von 1 W/cm^2 treten an 2 mm Glas etwa 14 °C Temperatursprung auf. Solange man schlechte Wärmeleiter als Hüllrohrmaterialien verwendet, verbieten sich schon bei kleinen Wärmestromdichten Anordnungen wie Abb.1c, da hier das Ausdehnungsgefäß gegenüber dem Bad stark unterkühlt ist. Das wurde an einer Anordnung aus Glas auch im Experiment nachgewiesen. Durch Verwendung von Metallen anstelle von Glas im Bereich des Wärmerohrverdampfers kann man diesen Temperatursprung um zwei bis drei Größenordnungen herabsetzen.

5.2. Thermometer mit Diphenyläther-Wärmerohr

Der einfachste Weg, um aus einem Einschlußthermometer ein temperiertes Thermometer zu machen, ist, das Hüllrohr des Einschlußthermometers zu öffnen, es mit Arbeitsmittel zu füllen, zu evakuieren und wieder vakuumdicht zu verschließen. Besonders einfach ist das bei Thermometern mit Richterscher Skalenaufhängung und Knopf durchzuführen.

Bei Wasser als Betriebsmittel kann man wegen der Tröpfchenkondensation die Skala nur schwer oder gar nicht ablesen,

es sei denn, man trifft Vorkehrungen wie in Abschnitt 5.1. Weiter hat Wasser die Skalenbeschriftung der von uns verwendeten Thermometer nach etwa 20 Min. abgelöst. Bessere Ergebnisse in dieser Hinsicht haben wir mit Glycerin und Diffusionspumpenöl, Marke Diffelen leicht, erreicht. Glycerin löst viel langsamer, zersetzt sich jedoch bei Temperaturen um 200 °C innerhalb 30 Minuten so stark, daß das Wärmerohr nicht mehr gut arbeitet. Bei kleineren Temperaturen arbeitet ein Glycerinwärmerohr ohne Kapillarstruktur wegen des kleinen Dampfdruckes ungenügend. Bei "Diffelen leicht" muß man über 250 °C gehen für ein ordnungsgemäßes Arbeiten des Wärmerohres.

Gute Ergebnisse haben wir erzielt mit Diphenyläther ((C₆H₅)₂O) als Arbeitsmittel. Wir haben ein Einschlußthermometer mit einem Bereich von -10 °C bis +310 °C, geteilt in 1/2 °C, im oberen Teil geöffnet, mit ca. 1g Diphenyläther versehen, evakuiert und mittels eines aufgeschobenen Schlauchstückes und eines Schliffhahnes wieder verschlossen.

Zunächst wurde das zum Umbau vorgesehene Thermometer mit einem anderen gleicher Bauart verglichen. Die als Kreuze in Abb.6 eingetragenen Meßwerte zeigen, daß es im Mittel 0,2 °C weniger anzeigt als das Vergleichsthermometer. Mit ca. 1g Diphenyloxid versehen, zeigt das Wärmerohrthermometer bei 150 °C 0,15 °C mehr an als das Vergleichsthermometer, bleibt aber bei steigender Temperatur mehr und mehr hinter dem Vergleichsthermometer zurück. Wir führen das darauf zurück, daß der Sumpf des Wärmerohres, der eine um den wärmeleitungsbedingten Temperatursprung in der Hüllrohrwand niedrigere Temperatur hat als das Bad, dem Ausdehnungsgefäß unmittelbar benachbart ist und dieses unter die Badtemperatur abkühlt.

Zur Vermeidung dieses unerwünschten Effekts wurden das Ausdehnungsgefäß und der Wärmerohrsumpf thermisch entkoppelt durch Einbringen einer schlecht wärmeleitenden Substanz zwischen beiden. Zu diesem Zweck wurde ein bei 262°C schmelzendes eutektisches Gemisch aus 22,6 Gew% NaCl und 77,4 Gew% ZnCl₂ als Pulvergemisch der Ausgangssubstanzen eingebracht

und zu einem etwa 12 mm hohen schlecht wärmeleitenden porenfreien Pfropf über dem Ausdehnungsgefäß niedergeschmolzen. Abb.7 zeigt den Unterteil des Thermometers mit dem Salzschnmelzpfropf über dem Ausdehnungsgefäß. Darüber ist Diphenyläther (M.P. 28°C, B.P. 259°C) eingefüllt. Das so vorbereitete Thermometer hat im untersuchten Temperaturbereich stets mehr angezeigt als das Vergleichsthermometer. Die Meßwerte sind als Dreiecke in Abb.6 dargestellt. Bei 206°C betrug die Differenz der Anzeigen 3,2 °C. Wieder sieht man wie in Abb.5, daß das Wärmerohr erst bei verhältnismäßig hoher Temperatur ausreichend Wärme zur Fadentemperierung transportiert. Bei mittleren und tiefen Temperaturen ist wegen des dort noch zu niedrigen Dampfdruckes des Diphenyläthers noch nicht mit Fehlerkompensation zu rechnen.

Um zu prüfen, wie weit der Fehler durch den herausragenden Faden mit dem durch ein Diphenylätherwärmerohr temperierten Thermometer vermindert wird, wurde der folgende Versuch gemacht.

Die Temperatur eines gut gerührten Silikonölbades wurde mit 3 Thermometern gemessen. Ein mit eingetauchter Ablesestelle betriebenes Thermometer aus einem geeichten Normalthermometersatz liefert die wahre Badtemperatur. Weiter wurde die Badtemperatur gemessen mit einem nur teilweise eingetauchten Normalthermometer im Anlieferungszustand und mit einem baugleichen Normalthermometer, das in der oben beschriebenen Weise mit einem Diphenylätherwärmerohr ausgerüstet war und dessen Eintauchtiefe der des unveränderten Thermometers entsprach.

In Abb.8 ist die Minderanzeige der beiden Thermometer über der wahren Badtemperatur aufgetragen. Man sieht, daß das unveränderte Thermometer eine durch den Fadenfehler bedingte, mit der Temperatur wachsende Minderanzeige zeigt, die bei 300°C 6,5°C beträgt. Das wärmerohrtemperierte Thermometer zeigt demgegenüber eine um den Faktor 2-3 kleinere Fehlanzeige.

Eine volle Fehlerkompensation wie in Abschnitt 5.1. war mit diesem Thermometer der wegen höheren Wärmestromdichten am Verdampfer und der damit verbundenen Temperaturabfälle nicht mehr möglich. Die Skalenabweichungen der Thermometer untereinander wurde bei Erstellung der Abb.8 mit berücksichtigt. Das wärmerohrtemperierte Thermometer zerbrach bei einer Temperatur von etwa 250 °C durch Berührung mit dem Rührpropeller des Bades.

6. Literaturverzeichnis

- /1/ F.Kohlrausch: Praktische Physik, Band I,
B.G.Teubner Verlagsgemeinschaft, Stuttgart,
21.Aufl., 1960
- /2/ H. Lux: Anorganisch-chemische Experimentierkunst,
I.A.Barth, Leipzig, 2.Aufl., 1959
- /3/ F. Reiß: "Temperiertes Flüssigkeitsthermometer"
OS P 21 61 3o3.6 (2o.6.1973)
- /4/ S. Dorner, F. Reiß und K. Schretzmann: Unter-
suchungen an Natrium-gefüllten Heat-Pipes,
Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe,
KFK 512, 1967
- /5/ F.E. Reiß: Ein Wärmerohr mit elektrostatischer
Flüssigkeitsförderung. Diss.Univ.Karlsruhe, 1973;
dto.,KFK 1478, 1973.
- /6/ Recknagel-Sprenger: Taschenbuch für Heizung
und Klimatechnik, R.Oldenbourg, München, 57.Aufl.,1972

Abb. 1 a

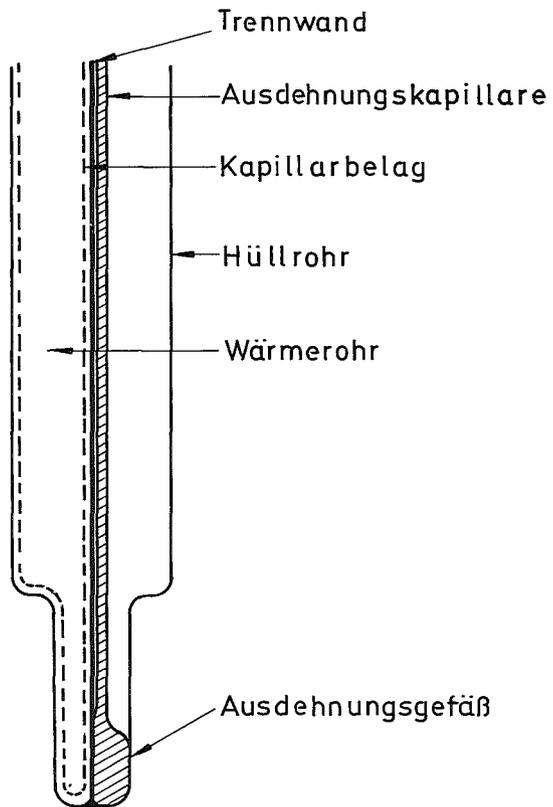


Abb. 1 b

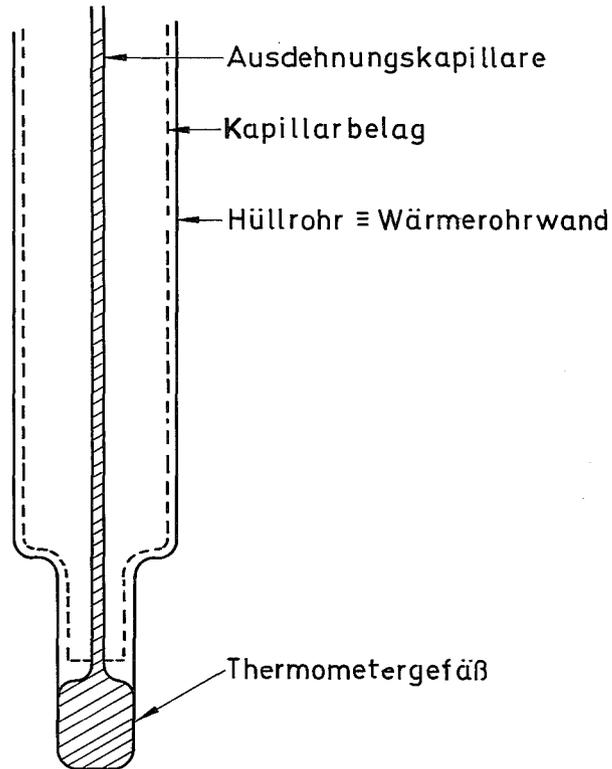


Abb. 1 c

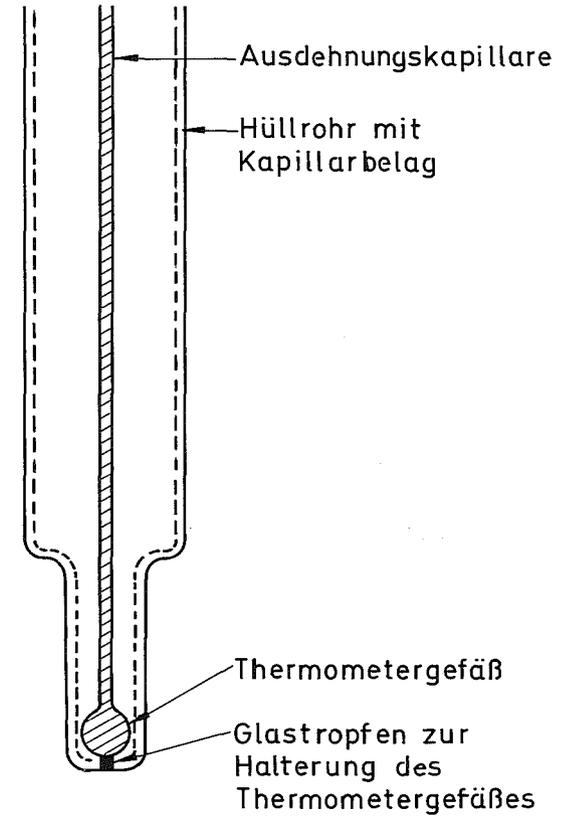


Abb. 1 Ausbildungsformen der Thermometergefäß - Wärmerohrverdampfer - Region

Abb. 2a

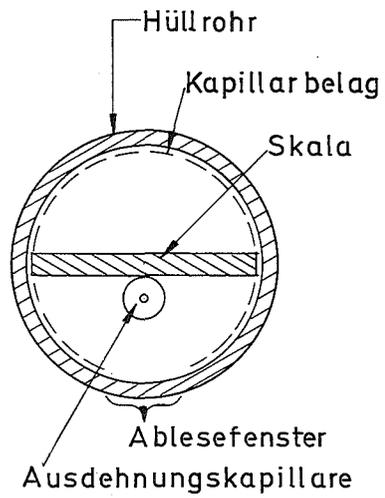


Abb. 2b

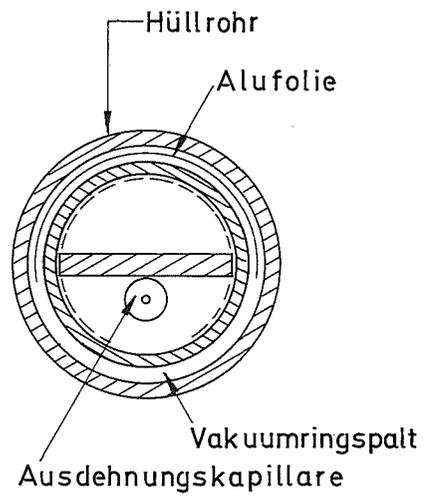


Abb. 2c

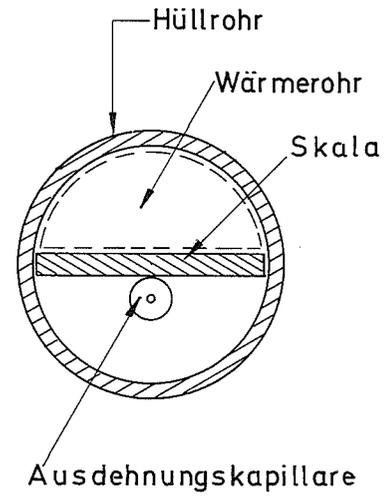


Abb. 2d

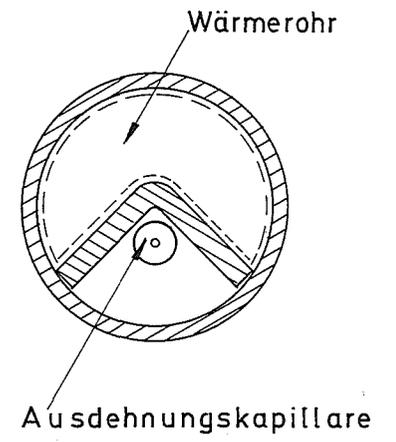


Abb. 2 Ausbildungsformen in der Höhe der Ablesestelle

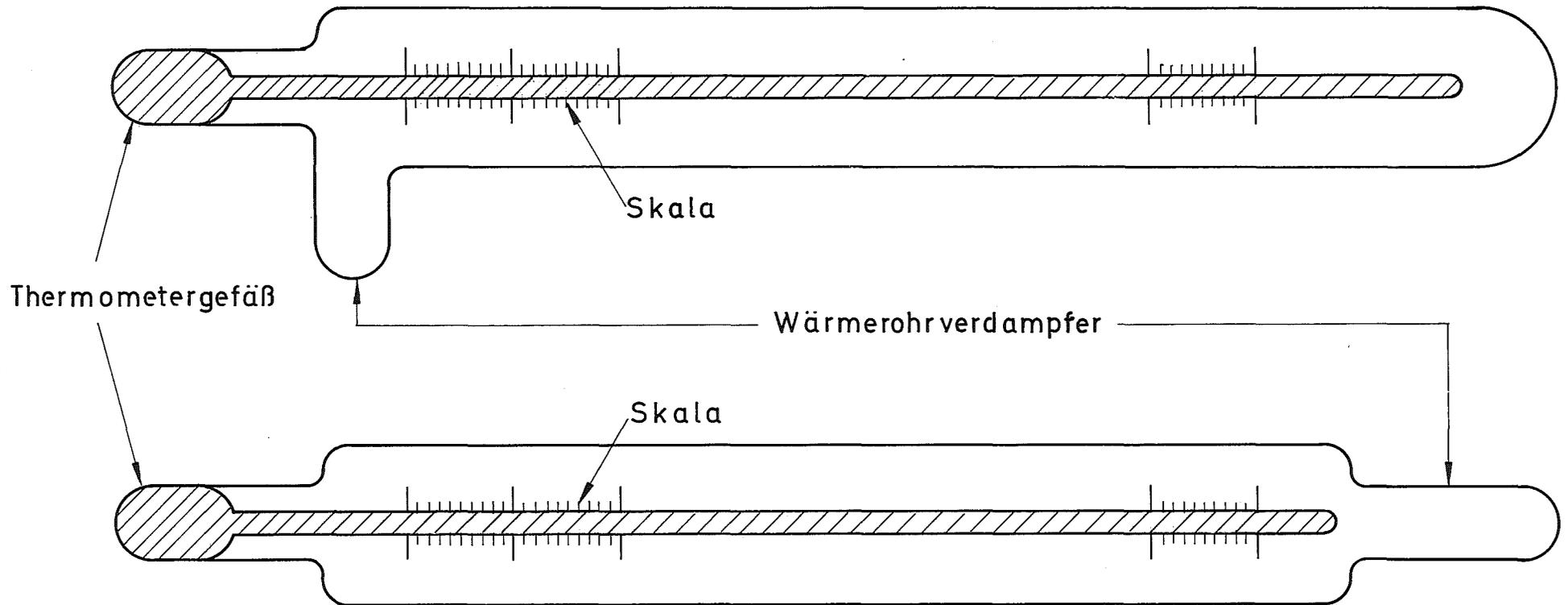


Abb. 3 Anordnungen mit räumlicher Trennung von Thermometergefäß und Wärmerohrverdampfer

Ansicht

Querschnitt

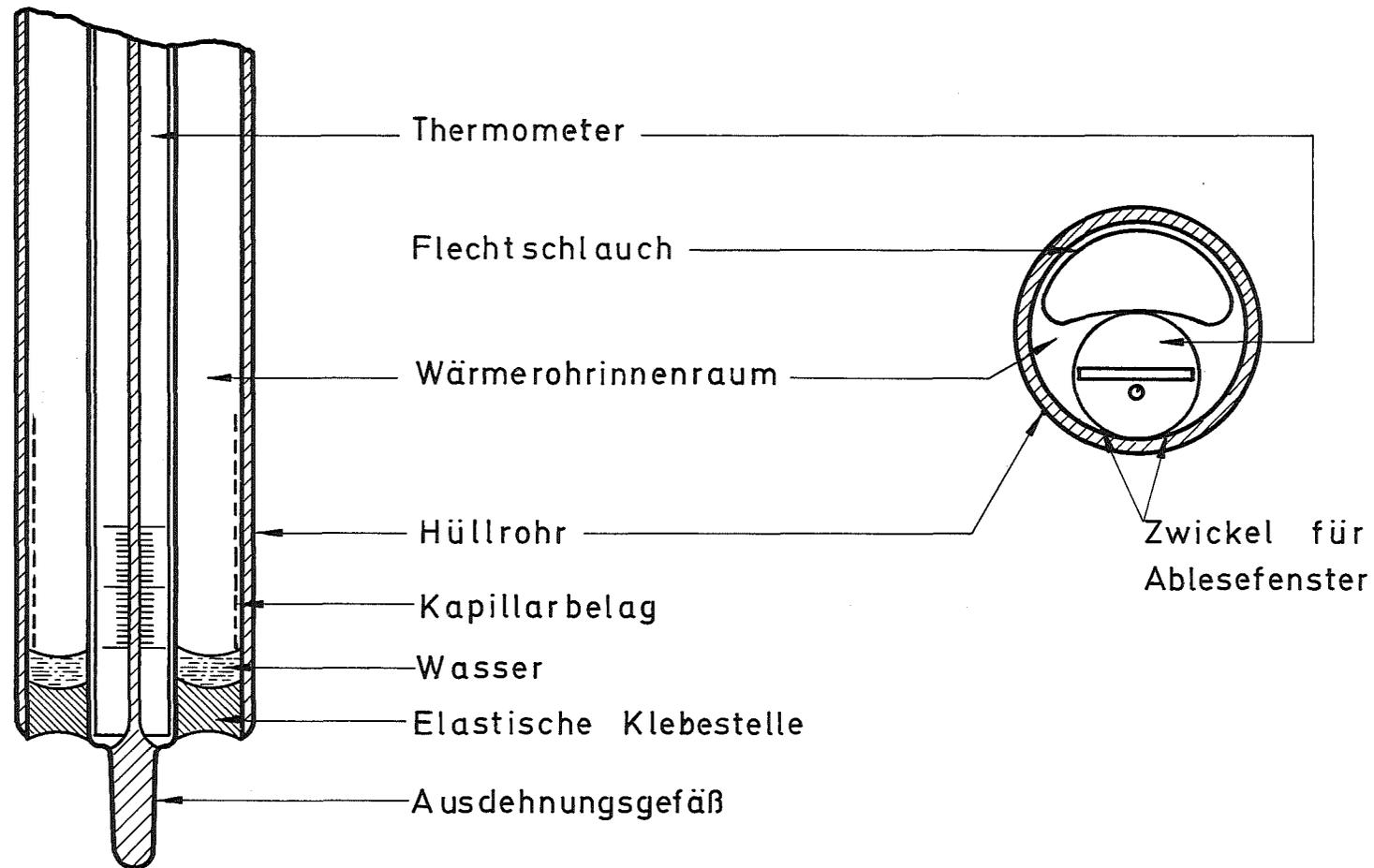


Abb. 4 Unteres Ende und Querschnitt eines temperierten Thermometers mit Wasserwärmerohr

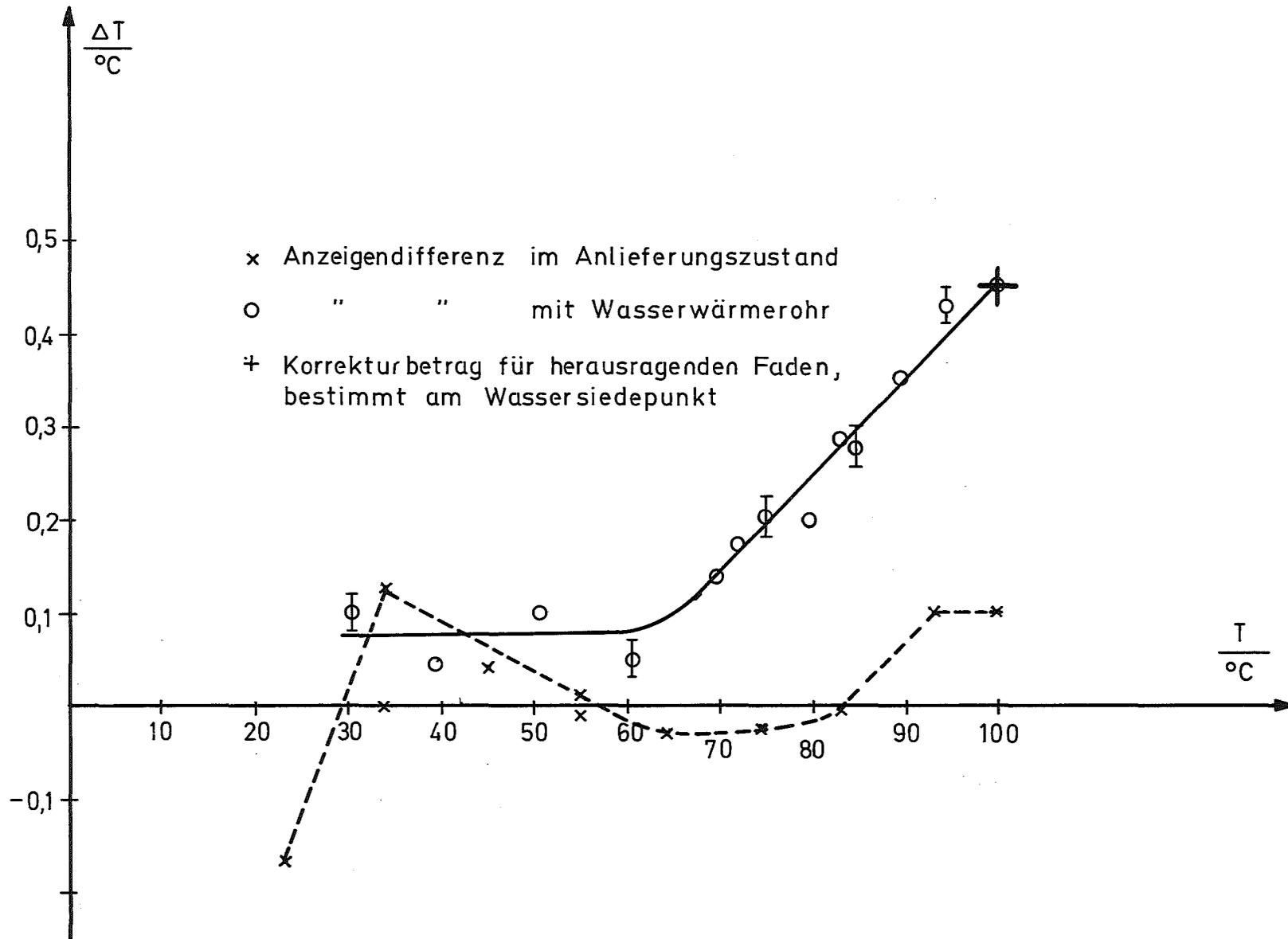


Abb. 5 Differenz zwischen den Temperaturanzeigen von Thermometer mit Wasserwärmerohr und unverändertem Vergleichsthermometer

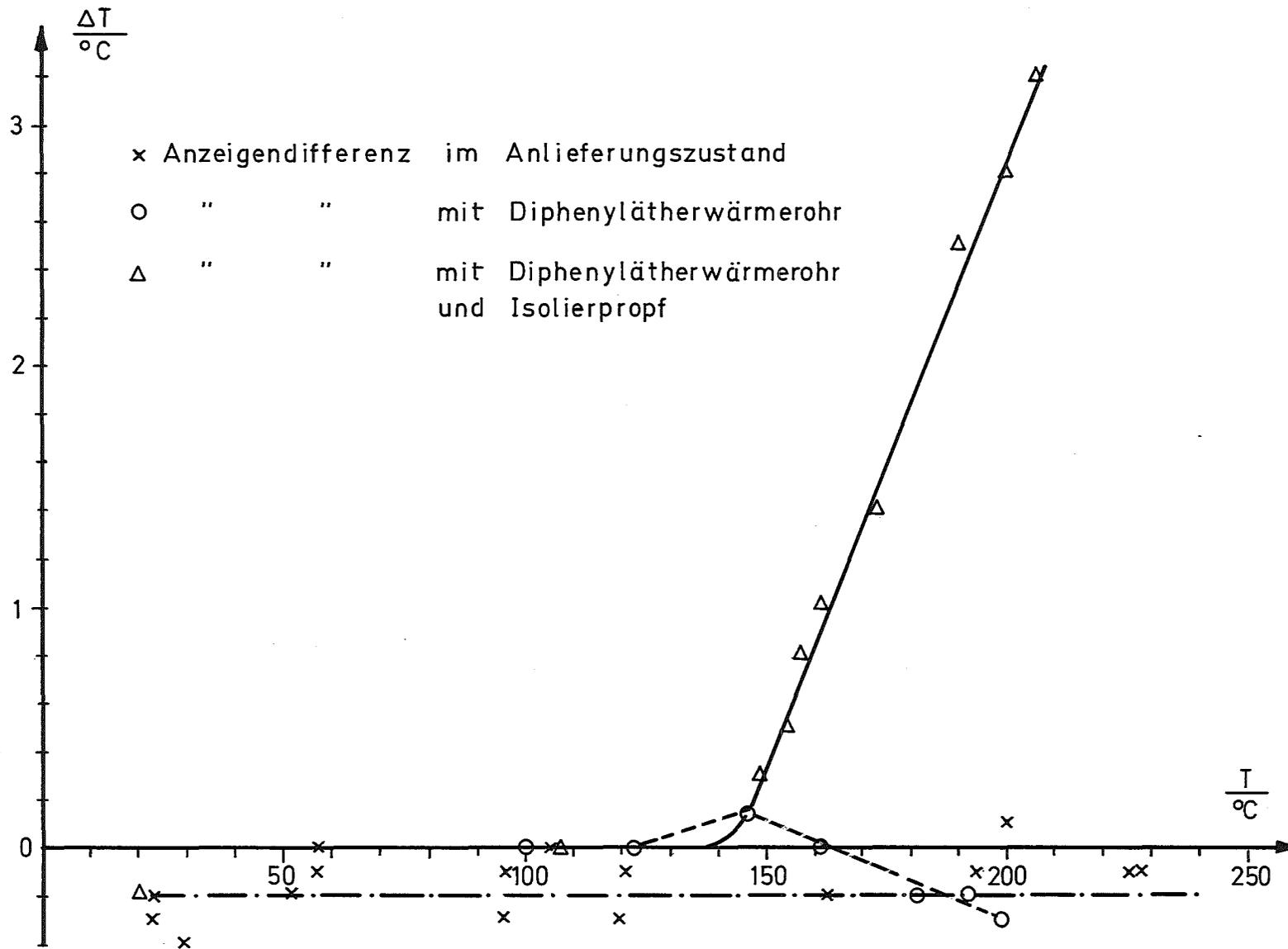


Abb. 6 Differenz der Temperaturanzeige von temperiertem Thermometer

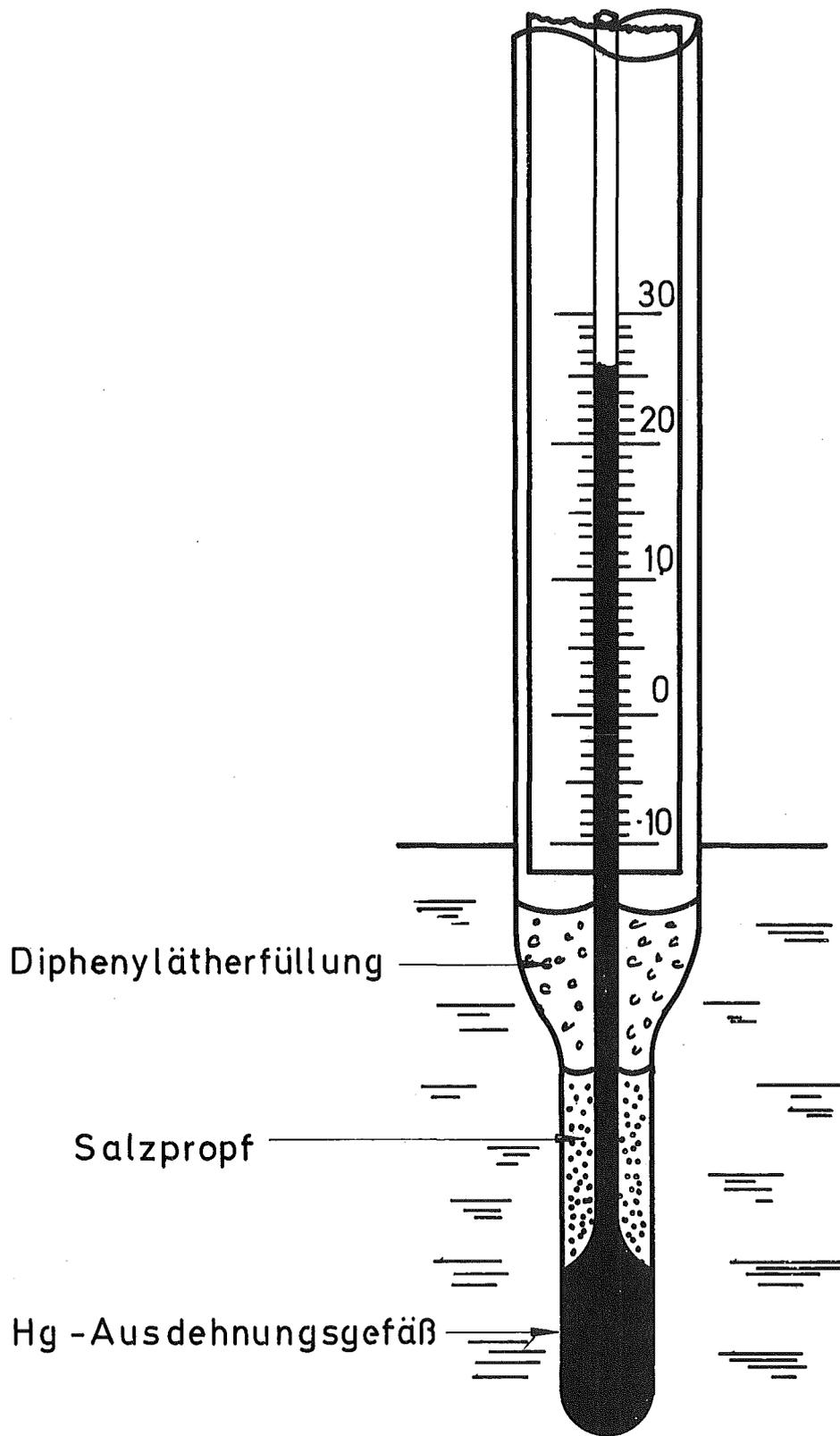


Abb. 7 Unterteil des Diphenylätherwärmerohr -
temperierten Thermometer mit
Isolierpropf

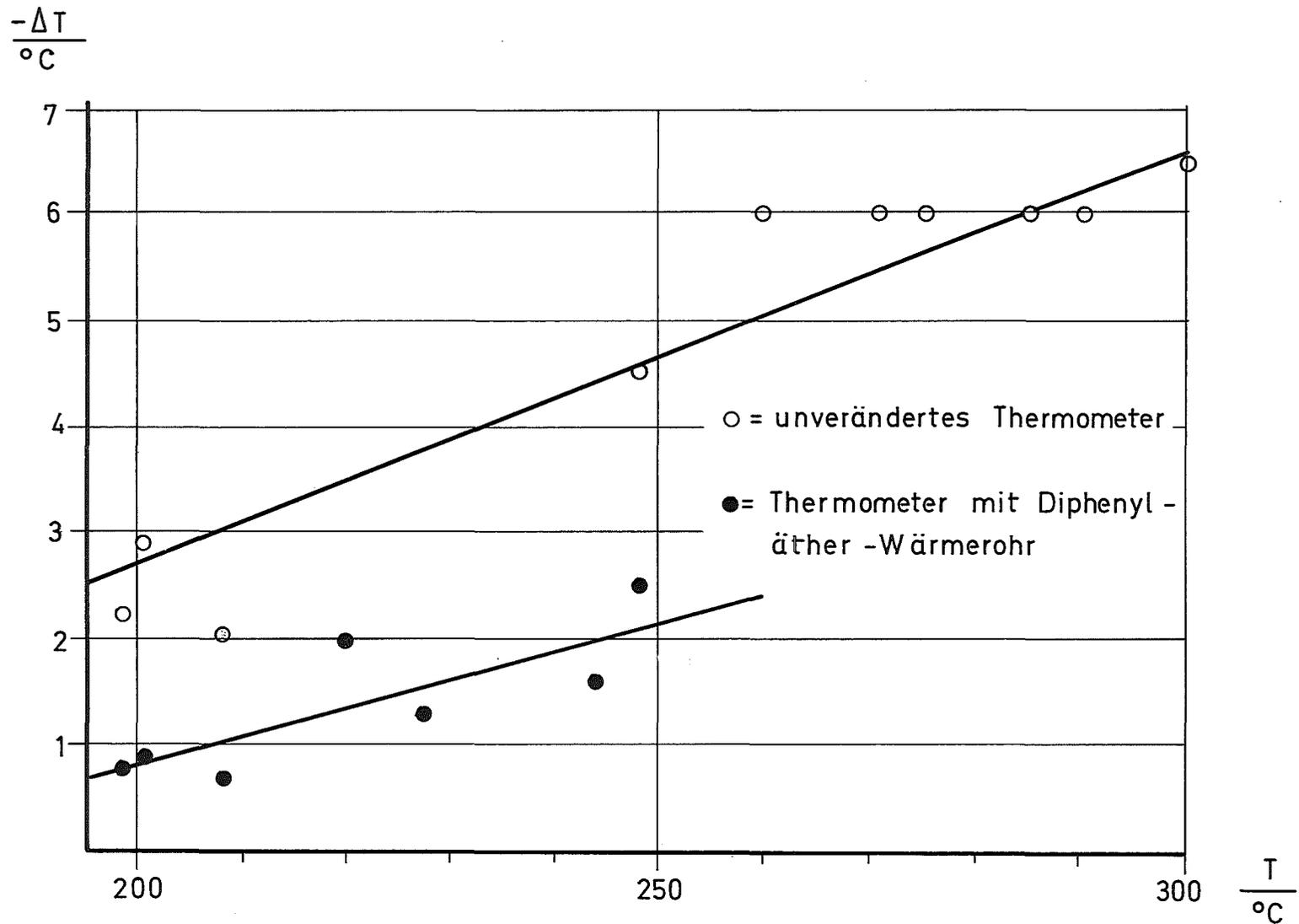


Abb. 8 Minderanzeige eines handelsüblichen und eines wärmerohrtemperierten aber sonst baugleichen Thermometers gegenüber der wahren Temperatur