

# Die Wärmeausdehnung fester und flüssiger Stoffe

von

**Hermann Ebert**

Dr. phil.

Oberregierungsrat und Mitglied bei der  
Physikalisch-Technischen Reichsanstalt



---

**Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH**

1940

# Die Wärmeausdehnung fester und flüssiger Stoffe

von

Hermann Ebert

Dr. phil.

Oberregierungsrat und Mitglied bei der  
Physikalisch-Technischen Reichsanstalt



---

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

1940

**Herausgeber dieses Heftes:  
Oberregierungsrat Dr. H. Ebert**

**Mit 34 Abbildungen**

**ISBN 978-3-663-00359-5      ISBN 978-3-663-02272-5 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-663-02272-5**

**Alle Rechte vorbehalten**

**DK: 536.412.082  
536.413.082**

## Vorwort

Wie die neue Sammlung „Verfahrens- und Meßkunde der Naturwissenschaft“ allgemein auf dem Gebiet der Naturwissenschaft mit den Verfahren und Meßmethoden vertraut machen und einen Überblick über das Vorhandene geben will, so will im besonderen dieses erste Heft die gestellte Aufgabe für die Wärmeausdehnung fester und flüssiger Stoffe erfüllen. Dabei wurde entsprechend der vielseitigen Heranziehung der Wärmeausdehnung fester und flüssiger Stoffe zur Erzielung bestimmter Erkenntnisse eine Übersicht über die Verfahren gegeben, so daß jeder, von welcher Seite er auch an die Frage der Wärmeausdehnung herankommt, einen Überblick erhält, der ihn, wenn nicht gerade ein fertiges brauchbares Gerät, so doch einen Hinweis gibt, in welcher Richtung er das für den Zweck Passende finden kann. Ein Hauptbestreben war, die Verfahren der Wärmeausdehnung in knapper Form zu geben; Nebensächliches und vor allem das für den eigentlichen Zweck Unwichtige wurden fortgelassen; diese zusätzlichen Geräte werden in geeigneten anderen Zusammenfassungen gebracht werden. Dabei fehlt es aber nicht an Hinweisen, was alles man bei Wärmeausdehnungsmessungen beachten und was geschehen muß, damit die Wärmeausdehnung fester und flüssiger Stoffe richtig gemessen wird.

So startet diese neue Sammlung mit dem ersten Heft, wie ich hoffe, für alle die als Helfer, die messend Naturgeschehen erfassen wollen.

Berlin-Wilmersdorf, im November 1939.

**Hermann Ebert**

# Inhalt

	Seite
<b>Einleitung</b> .....	1
Begriffsfestlegung .....	1
Übersicht über die Verfahren .....	2
Zusatzgeräte; Hinweise für die Praxis .....	3
<b>Die einzelnen Verfahren</b> .....	4
1. Abschnitt: Feste Stoffe .....	4
1. Kapitel: Lineare Wärmeausdehnung .....	4
I. Unmittelbare Verfahren .....	4
a) Komparator .....	4
$\alpha$ ) Einige praktische Ausführungen .....	5
$\beta$ ) Abtastverfahren unter Verwendung von Kompara- toren .....	7
$\gamma$ ) Verfahren für Drähte .....	8
b) Interferenzverfahren .....	8
$\alpha$ ) Einige praktische Ausführungen .....	11
$\beta$ ) Registrieren .....	14
c) Röntgenstrahlverfahren .....	14
$\alpha$ ) Besonders geeignet für hohe Temperatur .....	15
$\beta$ ) „ „ „ „ mittlere Temperatur .....	16
$\gamma$ ) „ „ „ „ tiefe Temperatur .....	16
$\delta$ ) Allgemeine Bemerkungen .....	17
II. Mittelbare Verfahren .....	18
a) Rohrverfahren .....	18
$\alpha$ ) Taster mit Hebelübertragung .....	22
$\beta$ ) Lichtzeiger .....	23
$\gamma$ ) Übersetzung ins elektrische Maß .....	29
$\delta$ ) Sonderaufbauten .....	31
b) Interferenzverfahren .....	31
c) Dreifußverfahren .....	33
d) Verfahren mittels Waagebalken .....	33
e) Verfahren für Drähte .....	34

	Seite
f) Verfahren mittels Bistreifen (Gläser) .....	35
g) Verfahren bei hohen Drucken .....	35
2. Kapitel: Kubische (Volumen-)Ausdehnung .....	36
I. Über unmittelbare Verfahren .....	36
II. Über mittelbare Verfahren .....	37
2. Abschnitt: Flüssigkeiten .....	38
I. Unmittelbare Verfahren .....	38
a) Kommunizierende Röhren .....	38
b) Besondere Anwendung (Öle) .....	39
II. Mittelbare Verfahren .....	40
a) Hydrostatische Verfahren .....	40
$\alpha$ ) Thermowaage (Volumenänderung am Umwandlungs-	
punkt) .....	41
$\beta$ ) Mittels Schwebekörpern .....	43
b) Thermometrische Verfahren .....	44
$\alpha$ ) Geschlossenes Pyknometer .....	44
$\beta$ ) Offenes Pyknometer .....	45
$\gamma$ ) Verdrängungsverfahren (Anwendung auf feste Körper) .....	45
$\delta$ ) Wäge-, Überlauf- oder Ausfließverfahren .....	45
$\epsilon$ ) Volumenometrisches Verfahren .....	46
$\zeta$ ) Verfahren für flüssige Gase (Helium) .....	50
$\eta$ ) Verfahren bei hohen Drucken .....	50
<b>Schluß: Empfehlungen für die Verwendung von Vergleichsstoffen und</b>	
<b>Tabellen dazu .....</b>	<b>52</b>
1. Feste Stoffe .....	52
a) Quarz .....	52
b) Glas 16 <sup>III</sup> .....	53
c) Sinterkorund .....	54
2. Flüssigkeiten .....	54
a) Wasser .....	54
b) Quecksilber .....	54
c) Geschmolzene Salze .....	56
Schrifttum .....	56
Namenverzeichnis .....	60
Sachverzeichnis .....	63

## Einleitung

Die Kenntnis der Volumenänderung eines festen oder flüssigen Körpers in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur ist in vielen Fragen der Physik und der Technik von besonderer Bedeutung; das um so mehr, als die Temperatur eine jener Zustandsgrößen ist, die, wie etwa auch der Luftdruck oder die Feuchtigkeit, in unserem täglichen Leben nicht wegzudenken ist.

Die Physik benötigt Ausdehnungswerte zur Aufstellung einer den festen oder flüssigen Stoff kennzeichnenden Zustandsgleichung, auf Grund der die Kenntnis des Aufbaus der Materie gefördert wird, die Technik aber für die vielen Fragen, die mit der Verwendung des Körpers zusammenhängen und deren Beantwortung es ermöglicht, nach eingehenden Versuchen Zusammensetzungen oder Gemische der Praxis zur Verfügung zu stellen, die diese gerade für einen besonderen Zweck braucht. Die Praxis kann darüber hinaus durch das Ausdehnungsverhalten bei Temperaturänderung auf den inneren Zustand insbesondere des festen Körpers schließen und so je nach Bedarf spannungsfreie oder in bestimmter Weise vorgespannte Körper herstellen.

Die Wärmeausdehnung — isobar — ist definiert durch den Ansatz

$$(1) \quad \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT} = \gamma \quad (\text{kubischer Wärmeausdehnungskoeffizient}),$$

wo  $V$  das Volumen und  $T$  die absolute Temperatur bedeuten. Über den theoretischen Zusammenhang dieser Größe mit anderen soll in diesem Zusammenhang nicht eingegangen werden [1].

Bei festen Körpern genügt sehr häufig die Angabe des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $\alpha$ ), des der Ausdehnung in nur einer Richtung. Bei Stoffen, deren Wärmeausdehnung von der räumlichen Richtung unabhängig ist, gilt näherungsweise

$$(2) \quad \gamma = 3 \alpha.$$

Für andere Stoffe gelten entsprechende, aber umständlichere Gleichungen [1].

Da die für die theoretischen Ausdehnungsgesetze notwendigen Konstanten in den meisten Fällen noch fehlen, benutzt man die bequemeren Interpolationsgleichungen, die in der Form für den linearen Ausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperatur  $t$  etwa lauten:

$$(3) \quad \alpha = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} = a + bt + ct^2 + \dots$$

Interpolationsgleichungen gelten für einen bestimmten Bereich, sind aber zu Extrapolationen ungeeignet. Man achte ferner darauf, daß die bei Umwandlungspunkten auftretenden Unregelmäßigkeiten nicht erfaßt werden.

Die nächsten Abschnitte, die eine Übersicht über die Verfahren zur Wärmeausdehnungsbestimmung geben sollen, werden unterteilt in die für feste und flüssige Stoffe. Während bei den letzteren nur die kubische Ausdehnung gemessen wird, bestimmt man bei den festen Stoffen in den meisten Fällen den linearen Ausdehnungskoeffizienten. Hierfür ist eine Fülle von Verfahren entwickelt worden. Diese werden daher zunächst behandelt werden. Daran schließen sich die für die Bestimmung des kubischen Ausdehnungskoeffizienten und das für Flüssigkeiten an.

Die Verfahren für die lineare Ausdehnung unterteilen sich in unmittelbare (absolute) und mittelbare (relative). Zur ersten Gruppe rechnen die Komparator-, Interferenz- und Röntgenstrahl-Verfahren, zur zweiten Gruppe alle jene, bei denen relativ zu einem Stoff gemessen wird, dessen Ausdehnungsverhalten bereits nach einem Verfahren der ersten Gruppe bekannt ist. Das sogenannte Rohrverfahren ist in vielen Abarten ausgebildet worden. Von dieser Vielheit wird eine Übersicht gegeben werden.

Eine besondere Forderung wird in vielen Fällen gestellt, indem verlangt wird, die Wärmeausdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur kontinuierlich aufgeschrieben zu erhalten. Zu diesem Zwecke sind Registriervorrichtungen in mannigfacher Weise ausgebildet worden, Vorrichtungen, die aber nicht charakteristisch für Ausdehnungsmeßverfahren sind. Sie können auch für die Aufzeichnung bei Meßverfahren anderer Eigenschaften verwendet werden. Deshalb werden diese Vorrichtungen hier nicht weiter ausführlich behandelt; nur in einzelnen Fällen wird kurz auf Besonderheiten für die Ausdehnungsmessungen hingewiesen werden. Es sind mechanische Schreibvorrichtungen, indem ein Schreibstift in Abhängigkeit von der Temperatur

die Ausdehnung oder zwei Schreibstifte Temperatur wie Ausdehnung in Abhängigkeit von der Zeit registrieren. Es ist auch möglich, solche Kurven photographisch zu erfassen. Dabei kann der zu untersuchende Stab selbst oder ein Anzeigergerät photographiert werden, oder es wird der Kurvenzug mittels Lichtstrahleindrucks auf lichtempfindlicher Schicht (durch doppelt gesteuerten Spiegel) festgehalten.

Auch die Fernanzeige ist keine besondere Eigentümlichkeit des Wärmeausdehnungsmeßverfahrens.

Zum Aufbau einer Ausdehnungsmeßapparatur gehören neben den in den nächsten Abschnitten beschriebenen Geräten einige Zusatzapparate; vor allem die zur Erzeugung der gewünschten Temperaturdifferenzen. Die zu verwendenden Öfen oder Thermostaten [2] müssen dem Temperaturbereich, wie auch dem besonderen Zweck der Wärmeausdehnungsmessung häufig angepaßt werden. Es ist dann zu beachten, daß die Sicht zum Ausdehnungsgerät nicht gestört wird; bei hohen Temperaturen sind Schlierenbildung und Rauchentwicklung im Gesichtsfeld unter allen Umständen zu vermeiden. Auch die Temperaturmeßgeräte müssen sorgfältig ausgewählt werden; neben dem richtigen Einbau [3] achte man darauf, daß das Thermometer stets die Temperatur des zu untersuchenden Stoffes anzeigt.

Sind diese zusätzlichen Apparateile richtig gewählt, so ist beim Versuch selbst noch manches zu bedenken. Ist der Ausgangszustand (z. B. die Ausgangslänge) mit hinreichender Genauigkeit bestimmt, so wird der Ausgangspunkt am Wärmeausdehnungsgerät gemessen. Stets muß nach einem Meßgang diese Ausgangsstellung geprüft werden, da erst dann die Güte der betreffenden Messung beurteilt werden kann. Die Nullpunktsänderungen können zu Aussagen über das Verhalten des Stoffes oder über dessen Zustand wertvolle Beiträge liefern. Es ist dabei meistens zu prüfen, wodurch etwa auftretende Nullpunktsänderungen bedingt sind. Es kann der vorhandene Meßdruck zu hoch gewesen, es können innere Spannungen verändert oder durch zu hohe Erhitzung bedingte plastische Verformungen eingetreten sein. In besonderen Fällen empfiehlt es sich bei festen Körpern, diese sowohl unter einseitiger Druck- als auch Zugbelastung zu untersuchen [4].

Wichtig ist ferner, daß das thermische Gleichgewicht abgewartet wird. Man erkennt das am ehesten durch Konstantwerden der Anzeige bei der betreffenden Temperatur.

# DIE EINZELNEN VERFAHREN

## 1. Abschnitt: Feste Stoffe

### 1. Kapitel: Lineare Wärmeausdehnung

#### I. Unmittelbare Verfahren

a) Komparatorverfahren. Ursprünglich diente der Komparator zum Vergleich fast gleicher Längen. Er wurde sowohl als Transversal-, wie Longitudinal-Komparator ausgebildet. Bei Wärmeausdehnungsmessungen nun werden mit ihm die Längenänderungen eines Probestabes gegenüber einer festgehaltenen Länge gemessen. Dazu ist es notwendig, daß die Enden des Stabes (etwa als scharfe Kanten) oder

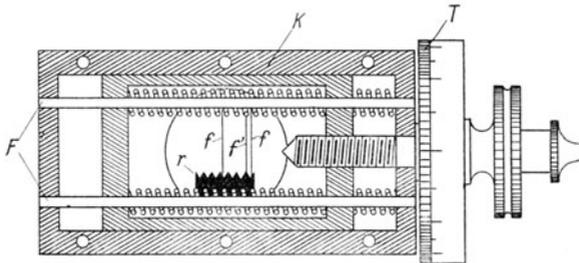


Abb. 1. Okularmikrometer: *F* Führungsstäbe, *K* Rahmen, *T* Ablese-  
trommel, *ff* bewegliche Korkfäden, *f'* fester Korkfäden, *r* Rechen

auf ihm angebrachte Meßmarken sichtbar sind; die verwendeten Temperaturbäder müssen mit Sichtöffnungen versehen sein. Besonders sorgfältig sind dann etwaige Störungen des Wärmegleichgewichtes zu beachten und auszugleichen.

Es ist nun bei Wärmeausdehnungsbestimmungen nicht unbedingt notwendig, einen Vergleichsstab mitzubeobachten. Es genügt, die durch Temperaturänderung bedingte Änderung der Länge gegenüber einem

festen, bekannten Abstand zu messen. Dazu dienen z. B. zwei mit Okularmikrometern versehene Mikroskope, die unverrückbar in einem bestimmten Abstand aufgestellt sind. Die Okularmikrometer ermöglichen es, z. B. den Abstand der Stabkanten von einem festen ausgespannten Faden auszumessen, ohne das Mikroskop selbst zu diesem Zweck zu bewegen. Das Innere eines Okularmikrometers zeigt Abb. 1. Im Rahmen  $K$  befindet sich ein durch eine Mikrometerschraube beweglicher Schlitten, der durch die Stäbe  $FF$  geführt wird. An ihm sind zwei Kokonfäden  $f$  befestigt; fast in der gleichen Ebene ist ein fester Faden  $f'$  eingebaut. Die Fäden müssen in der Bildebene des Mikroskops liegen. Die Verschiebung der beweglichen Fäden wird an der Trommel  $T$  abgelesen, die vorher durch Ausmessen eines in seinen Fehlern bekannten Meßstabes geeicht wird. Zur leichteren Feststellung

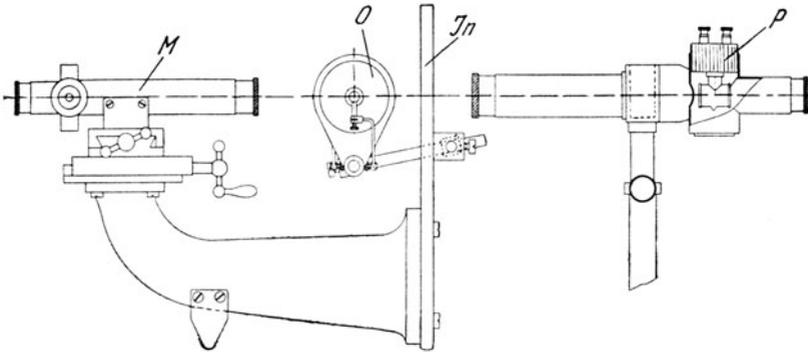


Abb. 2.

Horizontalkomparator bei hohen Temperaturen:  $M$  zwei Mikroskope (hintereinander) mit Okularmikrometern,  $O$  Ofen aus Nernstscher Masse,  $In$  Halteplatte aus Invar,  $P$  optisches Pyrometer

der Anzahl der ganzen Trommelumdrehungen dient ein kleiner Rechen  $r$ . Der tote Gang, den die auf den Stäben  $F$  angebrachten Federn mindern sollen, wird durch Ableseung im Vorwärts- und Rückwärtsgang weitgehendst ausgeschaltet.

$\alpha$ ) Als Beispiele für die Verwendung des Komparatorverfahrens sollen drei Anordnungen beschrieben werden, eine für sehr hohe und zwei für tiefe Temperaturen.

$\alpha_1$ ) Für sehr hohe Temperaturen (Ebert-Tingwaldt [5]). Zwei Mikroskope ( $M$  s. Abb. 2) mit Okularmikrometern, sowie der Ofen  $O$  aus Nernstscher Masse sind auf einer Invarplatte ( $In$ ) angebracht. Die Mikroskope sind auf zwei zueinander senkrecht verschiebbaren

Schlitten befestigt, der Ofen an einem Metallgestänge, das Bewegungen des Ofens nach allen Richtungen erlaubt. Die Schlitten sind unter Zwischenschaltung von Eisenschienen, das Gestänge unmittelbar mit der Invarplatte verbunden. Der Ofen hat zum Anvisieren der schneidenförmig ausgebildeten Kanten des zu untersuchenden Stabes zwei Öffnungen. Die Stabschneiden stehen senkrecht auf der Ebene durch Mikroskope und Stabachse. Die Öffnungen sind während der Messung zur Hälfte mit dem leuchtenden Stabende ausgefüllt, die andere Hälfte bleibt dunkel. Gemessen wird die Verschiebung der Grenze Hell gegen Dunkel durch den Unterschied in der Einstellung der beweglichen Fäden gegen den feststehenden. Auf der den Mikroskopen abgewendeten Seite befindet sich zur Temperaturmessung das optische Pyrometer ( $P$ ); Ofen und Invarplatte erhalten die notwendigen Visieröffnungen, ebenso das den Versuchsstab tragende Schiffchen, der Stab selber aber hat eine kleine Bohrung, damit die aus dem Innern der Bohrung kommende Strahlung als genügend schwarz angesehen werden kann. Um schädliche Erwärmung einzelner Apparateteile zu vermeiden, sind Asbestschirme mit verschließbaren Öffnungen zu verwenden. Mit dieser Anordnung können Wärmeausdehnungen bis etwa  $2500^{\circ}$  gemessen werden. Der Meßfehler beträgt etwa  $5 \mu$ .

Zur Bestimmung des Abstandes der festen Fadenkreuze und dessen Unveränderlichkeit während der Messung kann eine Vorrichtung dienen, die nach Bedarf zwischen  $O$  und  $M$  eingeschaltet werden kann. Diese Vorrichtung besteht aus einem gegen die Mikroskopachse geneigten Spiegel mit darüber befindlichem Maßstab.

$\alpha_2$ ) Für tiefe Temperaturen. Im Grunde ist die eben beschriebene Anordnung auch für den Bereich tiefer Temperaturen brauchbar, wenn nun der Thermostat zweckentsprechend hergerichtet wird. Dennoch soll auf zwei andere Anordnungen, wie sie tatsächlich benutzt wurden, hingewiesen werden.

Verwendet wurde von Scheel und Heuse [6] bis zu Temperaturen von  $-190^{\circ}$  ein großer, ausgezeichneter Transversalkomparator mit festen Mikroskopen, wie er nicht an allen Stellen verfügbar und auch nicht immer nötig ist. Im Falle der Scheel-Heuseschen Messungen mußte der zu untersuchende Stab auf besonders eingerichtete Wagen zum Vergleich mit einem Maßstab aus dem Gesichtsfeld gebracht und so gegen den Maßstab ausgetauscht werden. Das Temperaturbad erhält etwa die in Abb. 3 gezeigte Gestalt. Der Probestab  $P$  ist in dem Stahlrohr  $R$  eingeschlossen, in dem er in seiner ganzen Länge aufliegt.

Das Rohr befindet sich in einem wärmeisolierten (etwa doppelwandigen) Gefäß, das zur Aufnahme der Kühlflüssigkeit dient. Durch seitliche Ansätze werden die Stabenden, die Teilungen erhalten, anvisiert. Zur Vermeidung eines Feuchtigkeitsniederschlags auf den Verschlußstücken der Ansätze sind Hilfsheizungen vorgesehen. Zum Füllen des Rohres  $R$  mit einem Gas oder Evakuieren dient das Ansatzstück  $A$ . Das Widerstandsthermometer  $T$  befindet sich im Innern von  $R$ .

Mit einem Vertikal-Komparator (oder auch einem Kathetometer) ist die Apparatur von Kammerlingh-Onnes und Agt [7] für Temperaturen bis zu  $-253^{\circ}$  ausgestattet. Der zu untersuchende Stoff bildet den inneren Teil eines doppelwandigen Gefäßes und hat an zwei möglichst weit auseinander liegenden Stellen Platinspitzen. Der äußere Teil besteht aus Glas, hat in gleicher Höhe ebenfalls zwei Platinspitzen und wird auf konstanter Temperatur (etwa die des Zimmers) gehalten, während der innere je nach dem Temperaturunterschied mit verflüssigten Gasen gefüllt wird. Die Platinspitzen an der äußeren Wand bleiben in ihrem Abstand unverändert, die der inneren wandern. Diese Bewegung wird gemessen und ergibt die Wärmeausdehnung. Der Raum zwischen den Wandungen wird während des Versuchs weiter durch Kohle evakuiert.

Die Apparatur hat später einige Verbesserungen erfahren, die aber nicht grundsätzlicher Natur sind.

$\beta$ ) Ein unmittelbares Verfahren, das den Komparator als Hilfsgerät verwendet, ist von Gerdien und Jubitz [8] angewendet worden.

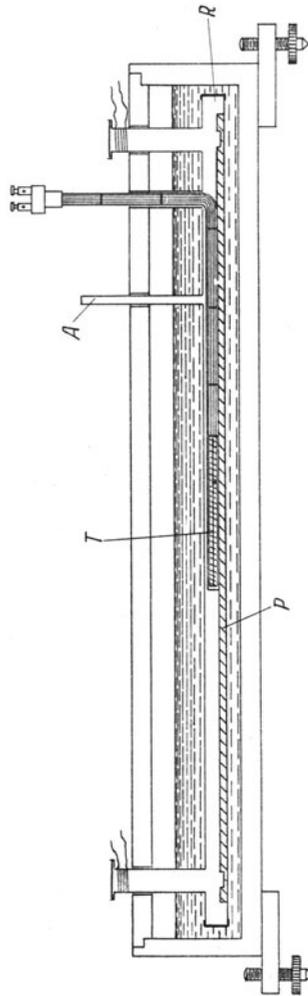


Abb. 3. Vorrichtung für Transversalkomparator und tiefe Temperatur:  $A$  Rohr zum Einlassen von Gas oder zum Evakuieren,  $P$  Probefäß,  $R$  Einschlußrohr,  $T$  Widerstandsthermometer

Der Versuchsstab wird — frei im Heizraum liegend — von beiden Seiten durch Taster abgetastet, die mit Schlitten bewegt werden können. Der Unterschied der Stellungen der Schlitten vor und nach Erreichen der Versuchstemperatur kann unter Berücksichtigung der Hebelarme der Taster oder nach vorheriger Eichung mit einem Maßstab oder elektrisch durch mitbewegte Schneiden an einem Schleifdraht außerhalb des Temperaturbades gemessen werden. Es ist auch vorgeschlagen worden, in Form von Schleppzeigern, Reiter mitbewegen zu lassen, deren Lageänderung z. B. mit dem Maßstab oder Komparator abgemessen wird.

Die Ausführung dieser Geräte verlangt große Präzision in allen seinen Teilen.

γ) Die Wärmeausdehnung von Drähten wird unmittelbar gemessen, indem sie in einem Glasgefäß (etwa in einem Lampenkolben) ausgespannt werden, nachdem vorher zwei Strichmarken angebracht worden sind. Der Abstand dieser Marken wird in Abhängigkeit von der Temperatur mit einem Komparator (je nach Lage des Drahtes mit einem Transversal- oder Horizontal-Komparator) bestimmt [9]; es empfiehlt sich, den Draht lotrecht zu hängen und etwa mit einem kleinen Gewicht zu beschweren. Ein Metalldraht wird durch elektrischen Strom erhitzt, so daß sehr hohe Temperaturen, soweit es der Stoff zuläßt, erreicht werden können.

b) Interferenzverfahren. So wie bei der Messung von Längen die Interferenzmethode besondere Bedeutung erlangt hat, so ist auch bei der Wärmeausdehnungsmessung neben dem Komparator fast gleichzeitig das Interferenzverfahren verwendet worden. Dabei wird weniger die Interferenz zwischen planparallelen Platten (Haidinger), als vielmehr die zwischen keilförmig gegeneinander geneigten (Fizeau [10]) benutzt. Dieses Verfahren ist in der von Pulfrich [11] vorgeschlagenen Form in die Meßtechnik eingegangen.

Während Fizeau einer Grundfläche aus Stahl ( $P_s$ , Abb. 4) mit ebener polierter oberen Fläche eine planparallele Glasplatte ( $P_g$ ) — schwach gegen die untere geneigt — gegenüberstellte, indem er sie auf drei die untere Platte durchsetzende Stahlschrauben lagerte, so daß bei Beleuchtung mit monochromatischem Licht Interferenzstreifen (Hell-Dunkel) entstehen, wählte Pulfrich als einheitliches Material Bergkristall, aus dem er — senkrecht zur Achse geschliffen — eine Boden- ( $G$ ) und eine Deckplatte ( $D$ , s. Abb. 5) als Begrenzung der Luft-

schicht herstelle. Die Höhe der Luftschicht wird dann durch einen Ring ( $R$ ) ebenfalls aus Bergkristall (meistens 10 bis 15 mm hoch) festgelegt. Das bedingt allerdings, daß die Höhe des Versuchskörpers –

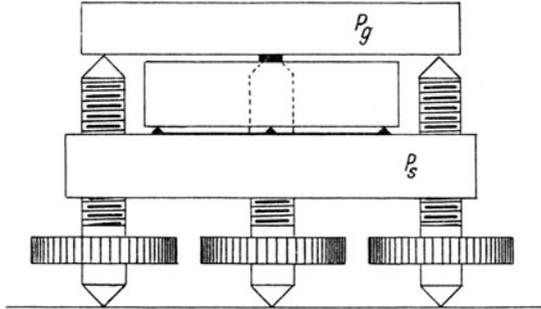


Abb. 4. Fizeausche Anordnung:  $P_g$  Grundplatte aus Stahl,  $P_s$  Deckplatte aus Glas

bei später noch zu erwähnenden relativen Versuchen – den einmal gegebenen Abmessungen angepaßt werden muß. Diese Anordnung ist dann auch aus Quarzglas hergestellt worden.

Bei Änderung der Temperatur wird der Ring – nur dieser soll zunächst allein betrachtet werden – seine Höhe und damit die Platten

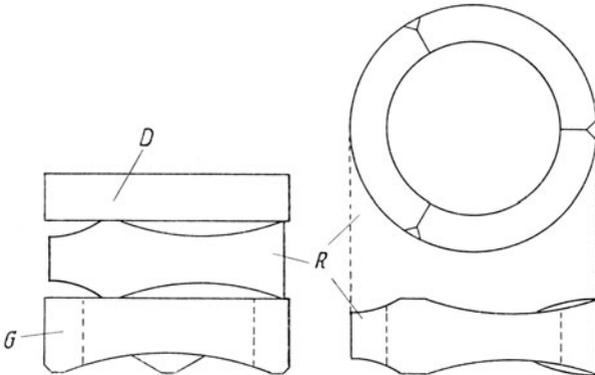


Abb. 5. Pulfrichsche Anordnung (aus Bergkristall, später aus Quarzglas):  $G$  Grundplatte,  $D$  Deckplatte,  $R$  ringförmiges Zwischenstück

ihren Abstand ändern. Dadurch wird das Licht zwischen den beiden Platten einen anderen Weg zurücklegen müssen. Das deutet sich, jedesmal wenn der Abstand um eine halbe Wellenlänge der gewählten Farbe geändert ist, durch ein Verlagern der hellen und dunklen Streifen

an. Grundsätzlich müßten diese durchwandernden Streifen ausgezählt und dann auf einfache Weise die Abstandsänderung berechnet werden. Denn ist  $\Delta h$  die Höhenänderung,  $\lambda/2$  die Wellenlänge und  $z$  die Zahl der durchgewanderten Streifen, so ist  $\Delta h = z \cdot \lambda/2$ . Die Zählung ist aber bei größeren Temperaturbereichen praktisch nicht sicher genug durchführbar. Zur Vermeidung von Fehlern benutzte Fizeau zehn feste Marken, gegen die er abzählte. Abbe [11] brachte nur eine Marke an, bestimmte deren Lage innerhalb eines Streifens mikrometrisch und führte das in mehreren Farben unmittelbar hinter- oder nebeneinander (dann also im gleichen Gesichtsfeld) aus. Damit werden aber an die Beschaffenheit der Interferenzstreifen erhöhte Anforderungen gestellt. Die Abstandsänderung wird dann, wie folgt, berechnet:

Es seien bei der Wellenlänge  $\lambda_1$  ( $z_1 + x_1$ ) Streifen an der Marke vorbeigewandert, wobei  $z_1$  eine ganze Zahl und  $x_1$  der mikrometrisch gemessene Bruchteil bedeuten; das gleiche gilt für die Wellenlänge  $\lambda_2, \lambda_3$  usw. Dann ist

$$(4) \quad \Delta h = (z_1 + x_1) \frac{\lambda_1}{2} = (z_2 + x_2) \frac{\lambda_2}{2} = (z_3 + x_3) \frac{\lambda_3}{2} = \dots$$

Daraus errechnet sich  $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} z_2 - z_1 = x_1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot x_1$ .

Nunmehr wird, da die rechte Seite aus den Beobachtungen bekannt ist,  $z_2$  berechnet, indem  $z_1$  die Reihe der ganzen Zahlen durchläuft. Von diesen für  $z_2$  gefundenen Werten werden nur die genommen, die nahezu ganzzahlig sind; sie stellen mit  $z_1$  zusammen eine mögliche Lösung der Gleichung dar. Genau so wird mit anderen Wellenlängen gerechnet, indem z. B. die Wellenlängenpaare  $\lambda_1$  und  $\lambda_3$ ,  $\lambda_1$  und  $\lambda_4$  der Rechnung zugrunde gelegt werden. Es sind dann wieder die nahezu ganzzahligen Werte  $z_3, z_4$  usf. herauszunehmen. Nur der Wert  $z_1$  ist zu wählen, bei dem alle anderen  $z$  zugleich ganzzahlig sind. Diese Zahlenfolge ist dann richtig, wenn sie — in die Gleichung (4) eingesetzt — nahezu das gleiche  $\Delta h$  ergibt. Ist das erreicht, so wird über die gefundenen  $\Delta h$  gemittelt.

Diese Überlegungen gelten nur unter der Voraussetzung, daß der Raum zwischen den Platten oder besser das ganze Gerät evakuiert ist. Im anderen Falle ändert sich mit der Temperatur auch das Brechungsvermögen  $n$  des Gases, etwa von  $n_1$  auf  $n_2$ . Alsdann tritt zu der gemessenen Streifenverschiebung eine Korrektur von dem absoluten

Betrage  $k = \frac{2 h'}{\lambda} (n_2 - n_1)$  hinzu, wo  $h'$  die Dicke der Gasschicht ist.

Ist  $n_0$  das Brechungsvermögen bei  $0^\circ$  und 760 mm Hg, so gilt für  $t^\circ$  und  $b$  mm Hg die Gleichung

$$(5) \quad n - 1 = (n_0 - 1) \frac{1}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \frac{b}{760}.$$

Tabelle 1. Wellenlängen einiger Spektrallinien [11]

Stoff	Farbe	in $\mu$	Kohärenzlängen in mm
		(Vakuum)	
Kr	gelbgrün	0,565 112 89	500 (Entladungsrohr gekühlt)
	rot	0,645 807 27	300 (Entladungsrohr ungekühlt)
	606	0,605 780 24	250
He	601	0,601 382 00	
	rot	0,668 000	
Hg	gelb	0,587 724	
	grün	0,501 708	
	grün	0,546 224	50
		in trockener Luft von 15°, 760 Torr, CO <sub>2</sub> -Gehalt etwa 0,03 Vol.-% <sub>0</sub>	
Cd	rot	0,643 847 00	bis 150
	grün	0,508 582 2	
		0,479 991 4	

Dieses Verfahren mittels Lichtinterferenzen ist eins der genauesten, da sich die Abstandsänderung auf einige tausendstel  $\mu$  bestimmen läßt. Ist einmal der Absolutwert der Ausdehnung des Ringes bekannt, so kann durch Hineinbringen eines Zylinders aus einem anderen Stoff mit oberer polierter Fläche zwischen den Platten die Wärmeausdehnung dieses Stoffes relativ zum Stoff des Ringes gemessen werden.

$\alpha$ ) Einige praktische Ausführungen von Apparaturen, mit denen nach diesem Verfahren Wärmeausdehnungen gemessen wurden, sollen folgen:

$\alpha_1$ ) Für Gebrauch bei hohen Temperaturen (Temperaturen über  $0^\circ$ ) befindet sich die Quarzapparatur, bestehend aus den beiden Platten und dem Quarzring (s. Abb. 6), im Innern eines von einem Thermostaten, der für Temperaturen unterhalb  $100^\circ$  mit Wasser beschickt wird, umgebenen Raumes (Scheel [12]); ein rechtwinkliges Prisma lenkt die Lichtstrahlen. Zur optischen Einrichtung gehören eine Lichtquelle, das Licht lenkende Prisma, solche zur spektralen Lichtzerlegung, sowie ein Beobachtungsfernrohr.

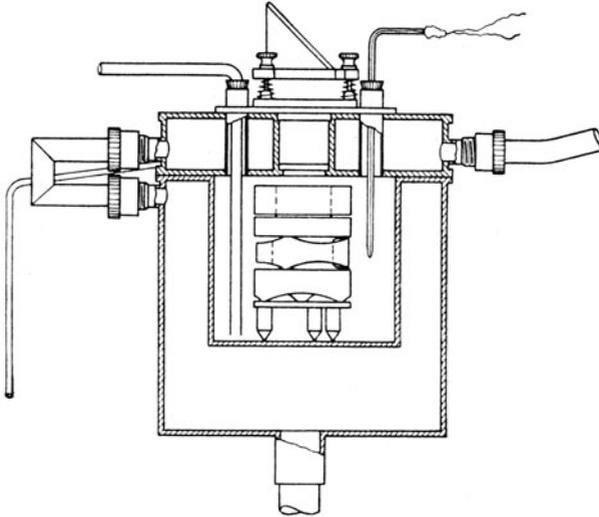


Abb. 6. Interferenzverfahren, Einrichtung für Temperatur über 0° C

Für tiefe Temperaturen haben Scheel und später Adenstedt [15] im Gebrauch bewährte Apparaturen entworfen. Zum Einsetzen in Flüssigkeitsbäder tiefsiedender Gase verwandte Scheel [13] und in einer zweiten Arbeit, bei der die Temperatur des flüssigen Wasserstoffs erreicht wurde, zusammen mit Heuse [14] den in Abb. 7 gezeigten Apparat, der dem für höhere Temperaturen gleich, indes ist er zum Zwecke der Ersparnis verflüssigter Gase klein gehalten; die umhüllenden Teile sind unter Vermeidung von Schrauben verkittet oder verlötet, so daß der innere Raum nach Erreichen der tiefen Temperatur evakuiert werden konnte, während er vorher mit einem Gas gefüllt war, das bis zur Versuchstemperatur nicht kondensierte. Auf diese Weise brauchte eine Gaskorrektur nicht mehr berücksichtigt zu werden.

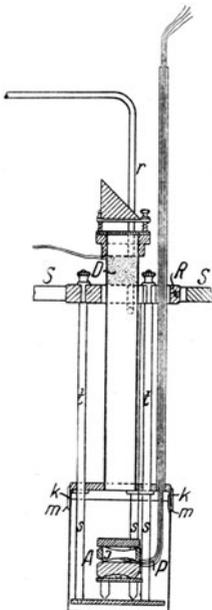


Abb. 7. Interferenzverfahren, Einrichtung für tiefe Temperaturen. *J* Deckel des Thermostaten, *R* Halterung, *D* elektrische Heizung, *P* Widerstandsthermometer, *A* und *s* Träger, *m* und *k* Verschlußstücke, *A* Interferenzeinrichtung, *J* Zwischenring

Adenstedt [15] benutzte für Temperaturen zwischen  $-195$  und  $0^{\circ}$  die in Abb. 8 wiedergegebene Anordnung, deren nähere Erläuterung sich aus der Erklärung der Buchstaben ergibt. Die An-

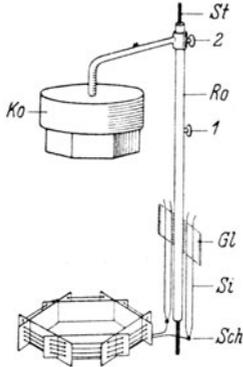


Abb. 8a. Anordnung des Platinwiderstandsthermometers: *Si* zwei Schleifen aus Silberdraht, *Sch* Lötstelle für *Si*- und *Pt*-Draht, *Gl* Befestigung (Glimmer) von *Si* an Rohr *Ro*, das über *St* (zu *K* Abb. 8) gleitet, 1 und 2 Klemmschrauben, *Ko* Sechseck zur Hebung von *Pt V* (Abb. 8)

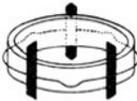


Abb. 9. Quarzing mit angepressten Proben

Abb. 8. Interferenzverfahren, Einrichtung für beliebige tiefe Zwischentemperaturen: *K* und *X* Träger der Ausdehnungsmeßapparatur, *Cu* Kupferblock, *PA* Widerstandsthermometer, *V* Verschlussstück, *G* Abschlussplatte aus Glas, *R* evakuierbarer Raum, *B* Verbindung von *V* mit *Cu*, *P* total reflektierendes Prisma, *W* Robonaxglasplatte zur Abschirmung langwelliger Strahlung, *F* Fassung dazu, *D* Dewargefäß, *M* von *Cu* umgebenes Messungsgefäß, *A* Außenraum, *I* und *II* Verbindungsmöglichkeit zwischen *A* und *R*, *III* Neusilberrohren als Führung für *Pt V*, *T* Tragketten für *Cu*, *Fi* Isolierung, *H* Heizspulen, *J* Eisenschiene

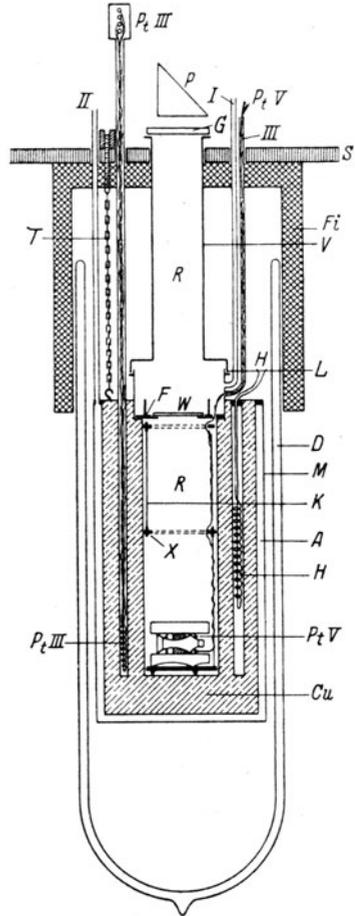


Abb. 8

ordnung des Platinwiderstandsthermometers zeigt Abb. 8a. Nur eine Besonderheit ist zu erwähnen. Im Falle der relativen Beobachtung ist es bequemer, den Versuchskörper nicht in Gestalt eines Zylinders mit planer Oberseite zwischen die Platten zu bringen, sondern statt dessen einen solchen aus Homosil. Alsdann werden aus dem zu unter-

suchenden Stoff drei kleine Säulchen mit Enden herausgeschnitten und in Dreiecksnuten eines Quarzringes eingelagert. Zur Verhinderung jeder Verschiebung der Säulchen werden sie durch einen Stahlring gehalten (s. Abb. 9).

$\beta$ ) Auch das Interferenzverfahren ermöglicht eine photographische Registrierung [16]. Das Wesentliche ist 1., daß das Gesichtsfeld schmal gemacht wird (entweder durch Abblenden mit einem Spalt oder Abbilden eines reellen Bildes der Interferenzstreifen durch eine Zylinderlinse zu Punkten) und 2. das Vorbeibewegen der photographischen Platte. Beim Herausblenden sind Newtonsche Ringe vorausgesetzt, so daß oben und unten im Gesichtsfeld je ein kleiner Strich zum gleichen Kreis gehört. Wandern nun die Ringe infolge Temperaturänderung, so werden sich auf der bewegten Platte die zusammengehörigen Striche einander nähern, bis sie sich in einem Punkte vereinigen. Auf der Platte entstehen so halbellenförmige Kurven, bis nach Erreichen der gewünschten Versuchstemperatur die auf der Platte gezeichneten Linien wieder einander parallel werden. Die dazwischen liegenden zusammengelaufenen Linien geben die Anzahl der durchgewanderten Interferenzstreifen.

Im Falle der punktförmigen Abbildung werden auf der parallel zu den Streifen bewegten photographischen Platte gerade, einander parallele Linien gezeichnet. Bei Temperaturänderung biegen die Linien (z. B. nach links) ab, bis wieder bei Erreichen der Versuchstemperatur parallele Linien entstehen. Die (im Falle des Beispiels linken) Durchstoßpunkte geben die Zahl der durchgewanderten Streifen an.

c) Röntgenstrahl-Verfahren. Eine andere Möglichkeit, Wärmeausdehnungen zu bestimmen, ergibt sich aus der Tatsache, daß bei Änderung der Gesamtlänge auch die kleinsten Aufbausteine (Elementarbereiche) in der gleichen Weise beeinflußt sein müssen. Mithin können jene Verfahren, die auf röntgenographischem Wege die Feinstruktur der Stoffe bestimmen, auch im Falle der Wärmeausdehnung mit Erfolg herangezogen werden. Sind die bestrahlten Netzebenen bekannt, so kann man die verschiedenen der röntgenographischen Gitterabstandsmessungen zu Wärmeausdehnungsbestimmungen benutzen. Es wird dann die Temperaturverschiebung der Interferenzabstände photographisch aufgenommen und die Interferenzlinienabstände (etwa mit einem Komparator) ausgemessen.

$\alpha$ ) K. Becker [17] benutzte die Debye-Scherrersche Anordnung (s. Abb. 10). Während bei nichtleitenden Stoffen eine Heizvorrichtung besonders eingebaut werden muß, können Metalle — in Drahtform — durch elektrischen Strom unmittelbar geheizt werden. Aus der Ver-

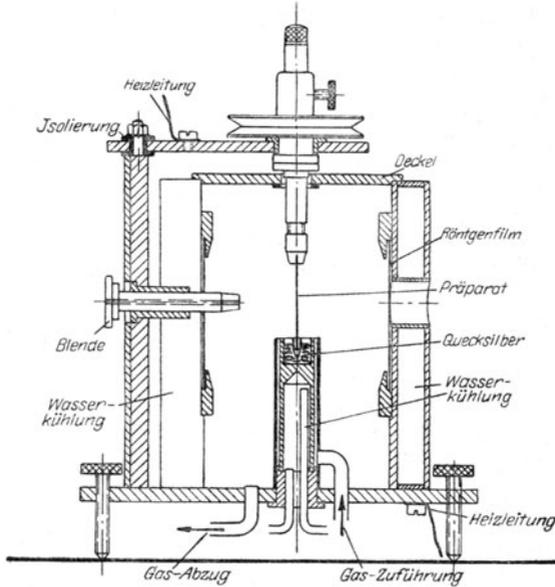


Abb. 10. Röntgenanordnung für hohe Temperaturen

schiebung der korrespondierenden Gleitwinkel  $\vartheta$  läßt sich bei Körpern des kubischen Systems der Ausdehnungskoeffizient nach der Gleichung

$$(6) \quad (1 + \beta t) = \frac{\sin \vartheta_0/2}{\sin \vartheta/2}$$

berechnen. Bei hexagonalem Gitter ist die Rechnung nicht viel umständlicher; es ist in der Schreibweise der Kristallographie:

$$(7a) \quad \begin{cases} \sin \vartheta/2 = k_{11} (h^2 + k^2 + hk) + k_{33} l^2 (t^0), \\ \sin \vartheta'/2 = k'_{11} (h^2 + k^2 + hk) + k'_{33} l^2 (t'^0); \end{cases}$$

daraus ergibt sich

$$(7) \quad \begin{cases} (1 + \beta t)_{(100)}^2 = \frac{k_{11}}{k'_{11}} \text{ in der } a\text{-Achse und} \\ (1 + \beta t)_{(001)}^2 = \frac{k_{33}}{k'_{33}} \text{ in der } c\text{-Achse.} \end{cases}$$

β) Für Temperaturen zwischen 20 und 300°C verwendete Saini [18] eine modifizierte Seeman-Böhlín-Kamera. Innerhalb der zylindrischen Kamera befindet sich — auf dem einen Teil des Umfangs angeordnet — der kristalline Stoff. Der Mitte dieser Schicht gegenüber ist das Eintrittsfenster des Röntgenstrahls. Dieser gelang nach seiner Reflexion an der kristallinen Schicht auf photographische Filme, die rechts und links (s. Abb. 11) vom Eintrittsfenster angeordnet sind. Der den zu untersuchenden Stoff tragende Teil der Kamera ist heizbar. Als Fehlerquellen sind die Exzentrizität der Kamera, sowie die ungenaue Lagerung des Films und des Stoffes zu beachten. Man begegnet den Fehlern durch

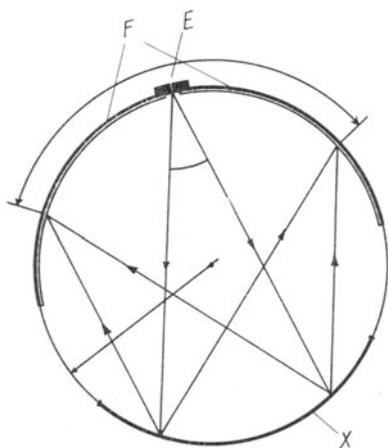


Abb. 11. Filmanordnung, Strahlengang:  
E Eintrittsfenster, F Film, X Versuchsstoff

elektrisch geheizten Ofen und wird um einen Winkel von etwa 60° geschwenkt. Aufgenommen wurden die Röntgenstrahlinterferenzen mit einem ebenen Film. Aus der Verschiebung der Interferenzstreifen wird, wie oben, der Wärmeausdehnungskoeffizient errechnet. In der gleichen Weise verfahren Kossolapow und Trapesnikow [20]; um etwaige Fehler auszuschalten, werden gleichzeitig oder bei unverändert gelassener Apparatur zur vorherigen Eichung Aluminiumlinien aufgenommen und gegen diese die des zu untersuchenden Stoffes vermessen.

γ) Ein Verfahren für tiefe Temperaturen stammt von Jacobs und Goetz [21], die die Braggsche Methode heranziehen. Vom Drehkristall gehen die Röntgenstrahlen durch einen mittels Feinschraube beweglichen Spalt und gelangen in eine Ionisationskammer.

Aufnahmen einer Kurvenschar, indem man bei den einzelnen Temperaturen eine Kurve: Gitterabstand — in Abhängigkeit von  $\cos^2 \vartheta$  errechnet. Das ergibt eine gerade Linie. Ihre Extrapolation auf  $\cos^2 \vartheta = 0$  ergibt den gesuchten Gitterabstand bei der betreffenden Temperatur. Durch Kombination dieser so gewonnenen Gitterkonstanten läßt sich der Ausdehnungskoeffizient des Probestoffes berechnen.

Auch Hanawalt und Frevel [19] verwenden ein Rückstrahlverfahren (s. Abb. 12); sie beobachten bei hohen Temperaturen. Der zu untersuchende Stoff befindet sich in einem

Der Thermostat ist entsprechend modifiziert, kann aber wohl einfacher gestaltet werden. Die Berechnungen sind grundsätzlich wieder dieselben.

δ) Das Röntgenstrahlverfahren ist noch in seiner Genauigkeit den anderen unterlegen; es werden Unsicherheiten von 10 und 15 % angegeben. Indes ist dabei zu beachten, daß gerade Verunreinigungen

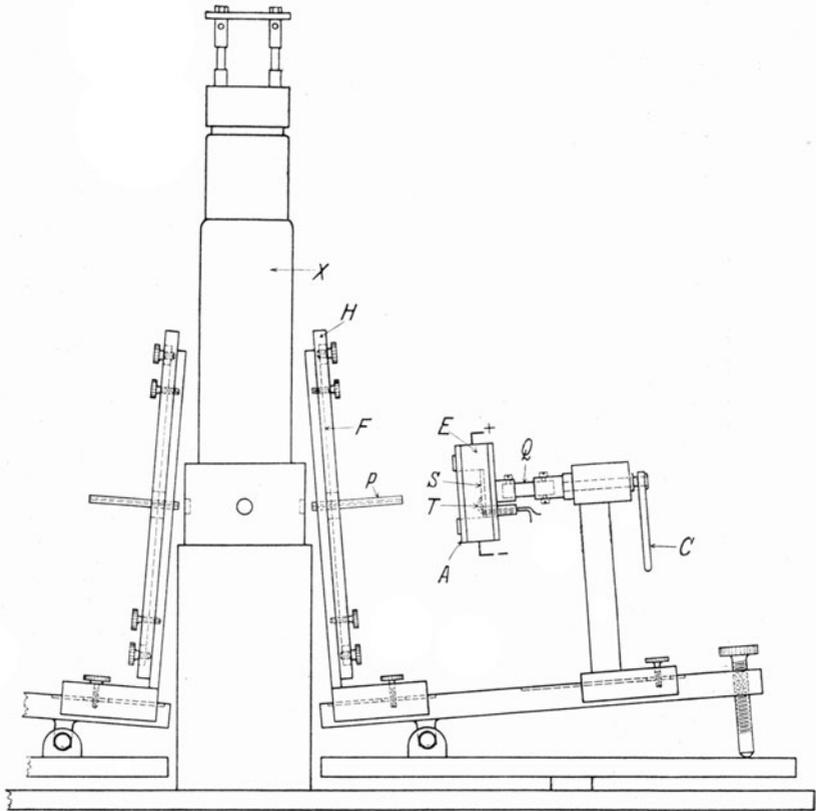


Abb. 12. Rückstrahlverfahren: *S* Versuchsstoff, *T* Thermoclement, *E* Ofen, *A* Aluminiumfolie, *C* Schwenkhebel, *Q* Quarzarm, *F* Film, *H* Filmhalter, *F* Führung für Strahlen, *X* Röntgenröhre

durch die Beschränkung der Beobachtung auf die kleinsten Bausteine stärker ins Gewicht fallen [22]. Ferner spielen auch der Spannungszustand und Fehlstellen des Probestückes eine Rolle, so daß es stets notwendig ist, sich über alle diese Dinge bei Beurteilung der Messung klar zu werden [23]. Das Verfahren benötigt nur eine geringe Menge

des zu untersuchenden Stoffes; es ist auch möglich, auf diese Weise am fertigen Stück die Wärmeausdehnung zu messen.

Damit sind im Prinzip die unmittelbaren (absoluten) Verfahren für die Bestimmung der linearen Wärmeausdehnung erfaßt. Entsprechend ihrer viel größeren Bequemlichkeit und des leichteren Aufbaus sind die mittelbaren Verfahren besonders zahlreich in ihrer Abart, kaum aber im Prinzip. Dennoch soll eine Übersicht über die Vielheit gegeben werden, da es sich zeigte, daß einige Apparaturen für Sonderzwecke ganz besonders geeignet und handlich sind.

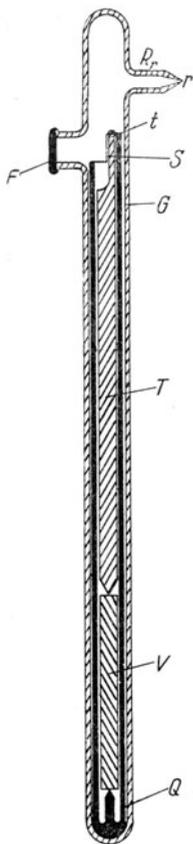


Abb. 13. Rohrverfahren für tiefe Temperaturen: *V* Versuchsstab, *T* Taster, *S* Schliffflächen mit Teilung *t*, *Q* Quarzrohr, *G* Glasrohr, *F* Fenster, *R* Rohr zum Einlaß von Gasen und Evakuieren, *r* Abschmelzstelle

## II. Mittelbare Verfahren

Vielfach ist es unnötig, den Aufwand eines Absolutverfahrens zu betreiben. Alsdann verzichtet man darauf, die Wärmeausdehnung unmittelbar zu messen, man begnügt sich vielmehr damit, sie mittelbar — durch Vergleich mit einem anderen Stoff, dessen Ausdehnung bereits bekannt ist, — zu bestimmen. Dadurch gewinnt man vor allem Einfachheit der Apparatur, wobei die relative Genauigkeit erheblich gesteigert werden kann. Rechnerisch ergeben sich keine Schwierigkeiten, da sich beide Ausdehnungen, die des bekannten und die des unbekanntes Stoffes, addieren. Mithin muß zu dem gefundenen relativen Wert des Wärmeausdehnungskoeffizienten der bekannte addiert werden, um für den zu untersuchenden Stoff die absolute Ausdehnung zu erhalten.

a) Rohrverfahren. Von den mittelbaren Verfahren ist das sogenannte Rohrverfahren das beliebteste (Henning [24]), bei dem sich das meist stabförmig hergerichtete Versuchsstück in einem Quarzrohr befindet (s. Abb. 13) — auf einer eingeschmolzenen Spitze lagernd. Auf dem Versuchsstab steht ein Taster, dessen Länge so abgeglichen ist, daß er in gleicher Höhe, wie das

äußere Quarzrohr abschließt. Beide — Umhüllungsrohr und Taster — werden an ihrem oberen Ende bis auf einen Durchmesser (also über einen halben Querschnitt) abgeschliffen, so daß vertikal verlaufende Schlißflächen entstehen, die Skalen aufgeritzt erhalten.

Bei weitem am häufigsten wird als Vergleichsstoff Quarzglas verwendet das von den tiefsten Temperaturen bis etwa  $1200^{\circ}$  benutzt werden kann und das trotz geringer Unregelmäßigkeiten in der Ausdehnungskurve wegen der sehr kleinen Wärmeausdehnung besonders geeignet ist. Grundsätzlich ist jeder Stoff, dessen Wärmeausdehnung bekannt ist, als Vergleichsstoff zu verwenden.

Die durch Temperaturänderung bedingte Verschiebung dieser Skalen gegeneinander — mit Okularmikrometern gemessen — ergibt relativ zum Vergleichsstoff (Quarz) die Wärmeausdehnung des zu messenden Stoffes. In dieser Form eignet sich das Gerät für einen Temperaturbereich von  $-190$  bis  $1200^{\circ}$ . Wird es in ein eng anschließendes Glasrohr ( $G$ , s. Abb. 13) gebracht, das in der Höhe der Schlißflächen  $S$  ein eingeschmolzenes, planparalleles Fenster  $F$  hat, so ist es für Temperaturen unterhalb  $-190^{\circ}$  verwendbar (Ebert [25]). Nach dem Zuschmelzen des oberen Endes wird  $G$  durch Rohr  $R$  evakuiert und z. B. mit gasförmigem Wasserstoff gefüllt. Die Anordnung kann nach dem Abschmelzen bei  $r$  in der gleichen Weise aufgebaut werden, wie der einfache Apparat.

Die Ablesung mit Hilfe der Okularmikrometer und die anschließende Berechnung sind ein wenig zeitraubend. Wesentlich einfacher wird das Gerät in seiner Handhabung, wenn Quarzrohr und Taster keine Schlißflächen erhalten, sondern am oberen Ende senkrecht zur Rohrachse angeschnitten werden. Das äußere Quarzrohr erhält ein Traggerüst (s. Abb. 14), das zu unterst aus einem metallenen Querbalke aus Leichtmetall besteht und in einer Unterdrehung fest auf dem Rohr aufsitzt, zur weiteren Sicherung mit hartem Kitt noch befestigt wird. Die beiden zur Stabachse parallelen Streben rechts und links (aus Quarzglas) sind in Vertiefungen des unteren Balkens eingelassen und tragen den zweiten Metallquerbalke, in dessen Schlitz eine Meßuhr gehalten wird (Hidnert, Ebert [26]). Diese ruht mit ihrem Taster auf dem nunmehr plan hergerichteten Ende des inneren Quarzrohres oder -stabes, der seinerseits die Bewegung des Versuchsstabes im Innern des weiteren Quarzrohres infolge Temperaturänderung abtastet. Auf diese Weise läßt sich nach vorheriger Prüfung der Meßuhr [27] die Wärmeausdehnung bequem und schnell messen, da die Ablesungen in Kürze ausgewertet sind. Für Messungen unterhalb  $-190^{\circ}$  wäre diese

Anordnung wegen des weiteren Einbaus in ein Umhüllungsrohr etwas umständlicher.

Die Anordnung des Versuchsstabes zwischen den beiden Spitzen ist häufig störend, da der Meßdruck wegen der geringen Flächen der

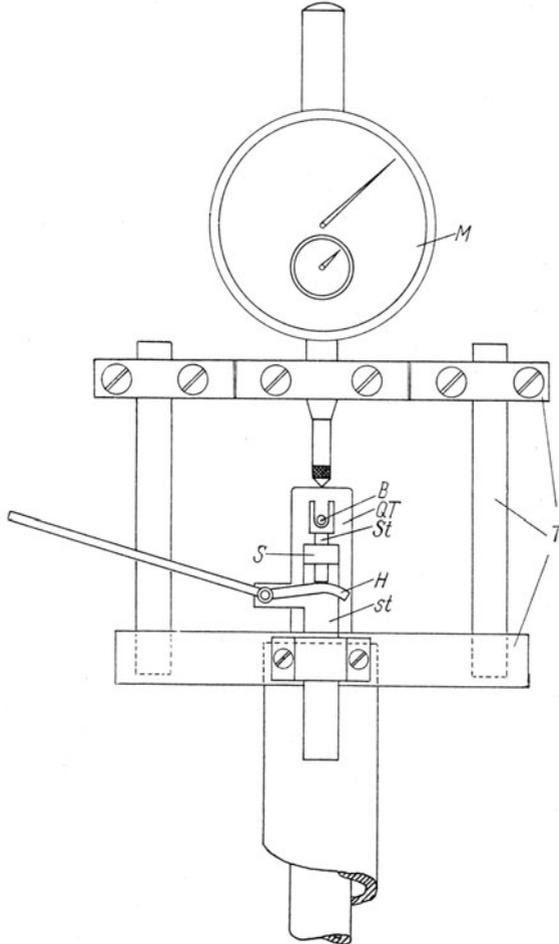


Abb. 14. Rohraufsatz mit Meßuhr und Entlastungsvorrichtung: *T* Traggerüst, *M* Meßuhr, *st* Aluminiumsteg, *St* Stift, *S* Führungsring, *B* Tragestift, *QT* Quarztaster

Spitzen doch unerwünscht groß werden kann. Dieser Hinweis ist bei Verwendung einer Meßuhr um so mehr zu beachten, als dann durch die zusätzliche Belastung der Meßdruck noch erhöht wird. Das kann

praktisch ausgeschaltet werden, indem der Versuchsstab entlastet wird [28]. Am unteren Metallquerbalken (s. Abb. 14) ist ein Aluminiumsteg mit einem kurzen seitlichen Arm befestigt. An diesem befindet sich ein ungleicharmiger winkliger Hebel ( $H$ ), auf dessen kurzen Hebelarm ein im Ring  $S$  geführter, beweglicher Stift ( $St$ ) drückt. Das obere Ende dieses Stiftes ist dollenförmig ausgebildet und trägt mittels einer Halterung ( $B$ ) den Quarztaster ( $QT$ ). Sind die Endflächen des Versuchsstabes genügend sorgfältig geschliffen und der Versuchsstab unverrückbar eingebaut, so kann durch Betätigen der Entlastungsvorrichtung der Versuchsstab während des Erwärms völlig entlastet werden. Es wird dann nur im Augenblick der Ablesung — wenn sich die gewünschte Temperatur eingestellt hat — durch vorsichtiges, mehrmaliges Abtasten die Einstellung der Meßuhr bestimmt.

Der Form des Versuchsstabes kann das Gerät weitgehend angepaßt werden; indes ist es zweckmäßig, die Stücke nicht zu kurz (etwa 10 cm) und nicht zu dick (entsprechend der Wärmeleitung) zu wählen. Bei vorgegebener Dicke (begrenzt durch die Weite des äußeren Quarzrohres) kann die Länge der Versuchsstäbe noch ver-

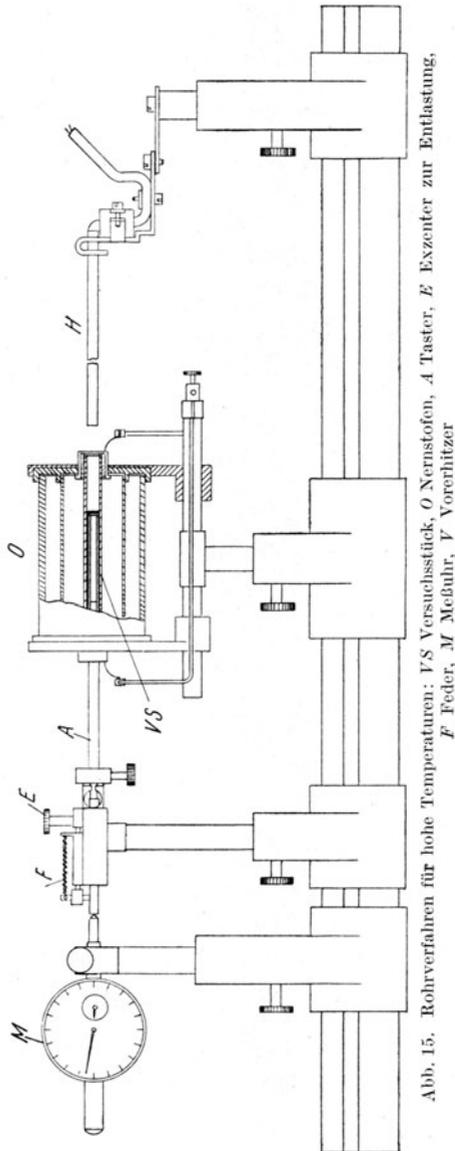


Abb. 15. Rohrverfahren für hohe Temperaturen: VS Versuchsstück, O Nernstofen, A Taster, E Exzenter zur Entlastung, F Feder, M Meßuhr, V Vorerhitzer

schieden sein: es empfiehlt sich daher, nicht einen einzigen, sondern einen ganzen Satz Taster verschiedener Länge vorzusehen.

Allgemein wird die Unsicherheit der Messung bei Beachtung aller Vorsichtsmaßnahmen auf etwa  $1 \mu$  geschätzt. Zum besseren Wärmeaustausch wird das äußere Quarzrohr häufig seitlich geöffnet oder in irgendeiner anderen Art — etwa durch Aufgabe der Rohrform — günstiger gestaltet. Es ist dann aber darauf zu achten, daß in einem Flüssigkeitsbade, in dem die Badflüssigkeit umgerührt wird, der Stab besonders vorsichtig eingebaut sein muß, damit er mit Sicherheit durch die umwälzende Flüssigkeit nicht verlagert wird.

Für hohe Temperaturen hat sich die in Abb. 15 gezeigte Einrichtung bewährt [28]. Als Vergleichsstoff bis etwa  $1700^{\circ}$  kann Sinterkorund verwendet werden. Das Ausdehnungsgerät ist horizontal gelegt. Die eingebaute Feder  $F$  und die der Meßuhr sorgen für eine eindeutige Lage des Stabes. Während der Erhitzung kann die Apparatur durch den Exzenter ( $E$ ) entlastet werden. Zur Bestimmung der Temperatur mit einem optischen Pyrometer ist eine Öffnung am Rohr aus Sinterkorund etwa in der Mitte des Versuchsstabes angebracht. So sind Längenänderung und Temperatur bekannt.

α) Die durch die verschiedene Ausdehnung des Probestückes gegenüber dem Vergleichsstoff bedingte Bewegung des Tasters kann auf die mannigfaltigste andere Weise gemessen werden, so z. B. in der Anordnung nach Chevenard [29]. Diese ist vielfach angewendet und abgeändert worden. Sie läßt sich aber kaum vom Laboratorium oder Betrieb selbst herstellen, als fertiges Gerät ist sie von einigen Firmen in verschiedenen Abarten käuflich zu erwerben. Der Taster wirkt beim Chevenardschen Gerät auf einen Hebel, an dem ein Schreibstift befestigt ist. Letzterer zeichnet während des Versuchs auf einem um seine senkrechte Achse drehbaren Zylinder die Ausdehnung in Abhängigkeit von der Zeit auf. Um gleichzeitig die Temperatur aufzuschreiben, wird in das äußere Quarzrohr (oder den Quarzhalter) neben dem Probestück ein Stab mit bekannter Wärmeausdehnung eingebaut, der ebenfalls über einen Taster auf einen Schreibstift wirkt. Dieser schreibt auf das gleiche Koordinatenpapier die bekannte Ausdehnung des zusätzlichen Stabes, die später in Temperatureinheiten übersetzt wird. Für den Bau und die Anordnung der Hebelvorrichtungen ist größte Sorgfalt notwendig. Es werden beide Kurven in Abhängigkeit von der Zeit erhalten: soll nun die Wärmeausdehnung des Probestabes in Abhängigkeit von der Temperatur wiedergegeben werden, so ist eine Umzeichnung notwendig.

Dazu dienen Schablonen, von denen die eine für die unbekannte Ausdehnung des Probestabes etwa in mm/m, die andere in Temperatureinheiten eingeteilt ist. Dieses Verfahren hat also den Vorteil, auch den zeitlichen Ablauf des Versuchs zu erfassen, ist aber umständlich in der Gewinnung der Ausdehnungs-Temperaturkurve. Für die unmittelbare Aufzeichnung dieser Kurve ist die Übertragungsvorrichtung abgeändert worden, indem ein Dreifußsystem eingebaut wurde. Von diesem wird die eine Stütze festgehalten, während die beiden anderen je von der Probe mit bekanntem und unbekanntem Ausdehnungskoeffizienten bei Temperaturänderung so bewegt werden, daß die eine — würde sie allein wirken — den Schreibstift in horizontaler, die andere in vertikaler Richtung ausschlagen ließe. Bei Zusammenwirken beider ergibt sich die gewünschte Kurve: Ausdehnung der zu untersuchenden Probe in Abhängigkeit von der Temperatur.

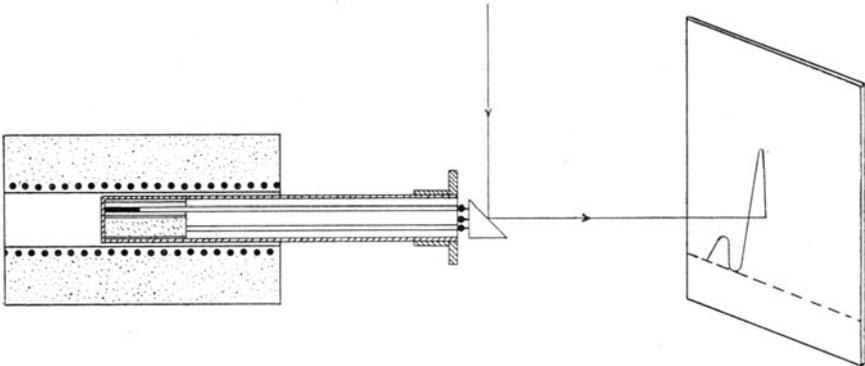


Abb. 16. Rohrverfahren mit optischer, selbsttätiger Aufzeichnung

β) Dieses Gerät läßt sich auch unter Zwischenschaltung von Pendelstützen mit Einbau einer Federanlenkung zur Stabilisierung der Vorrichtung [30] mit einer optischen Einrichtung [31] versehen, indem ein auf den Dreifuß gesetztes Prisma einen Lichtstrahl ablenkt (s. Abb. 16). Die Registrierung mit dem Schreibstift hat gegenüber der meist sauberen photographischen den Vorteil, daß sie bereits während des Versuchs sichtbar und so die Möglichkeit gegeben ist, etwaige Unregelmäßigkeiten sofort festzustellen. Beim photographischen Verfahren muß erst das Entwickeln abgewartet werden. Diese optische Einrichtung ist in vielen Fällen auch zur subjektiven Beobachtung angewendet worden. Eine der ersten Anordnungen stammt von Werner [32]. Auch hier ist ein Dreifuß verwendet worden. Soweit

nur die Ausdehnung beobachtet werden soll, wirkt der Taster *S* (Abb. 17) auf eine der Stützen, während die beiden anderen festliegen. Die Platte *P<sub>2</sub>* wird durch den Taster um die Verbindungslinie der beiden anderen

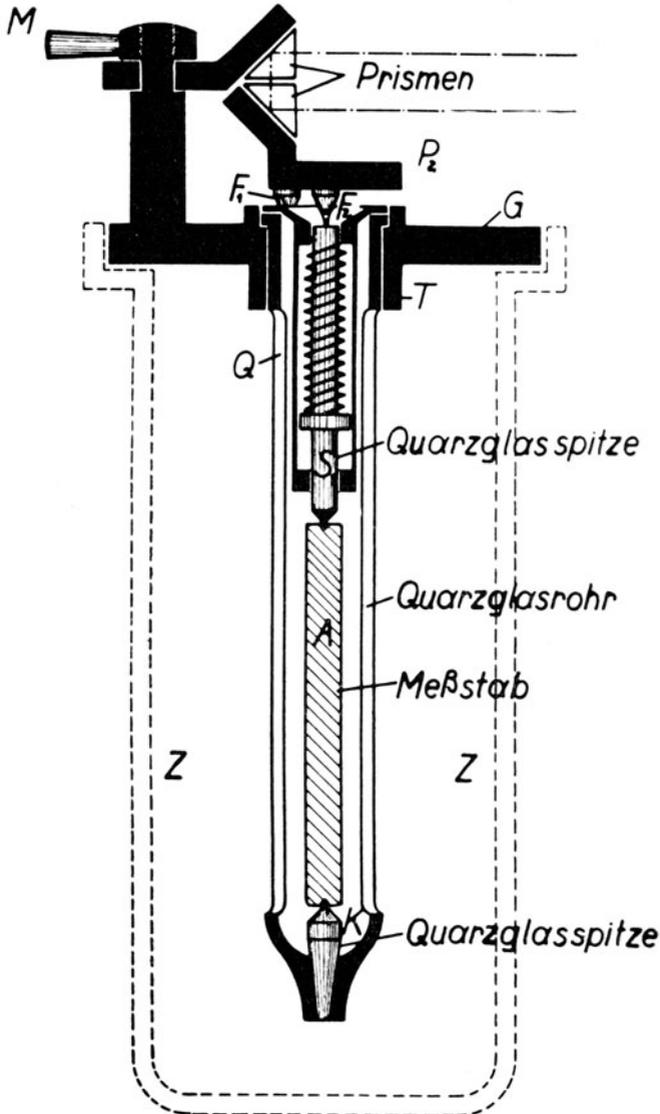


Abb. 17. Rohrverfahren mit optischer Ablesung:  $F_1, F_2$  Stützen für  $P_2$ ,  $G$  Abschlußplatte für Bad  $Z$ ,  $T$  Einsatz,  $S$  Taster,  $Q$  Quarzrohr,  $A$  Versuchsstück,  $M$  Schraube,  $K$  Spitze

gedreht. An  $P_2$  ist ein rechtwinkliges Prisma angebracht, dem spiegelbildlich ein zweites an einem besonderen Halter gegenübersteht. Die Veränderung des Winkels zwischen den Prismen wird mit Hilfe einer beleuchteten Skale und eines Autokollimationsablesefernrohrs bestimmt. Im Zusammenhang mit dieser Einrichtung gab man den Probestäben

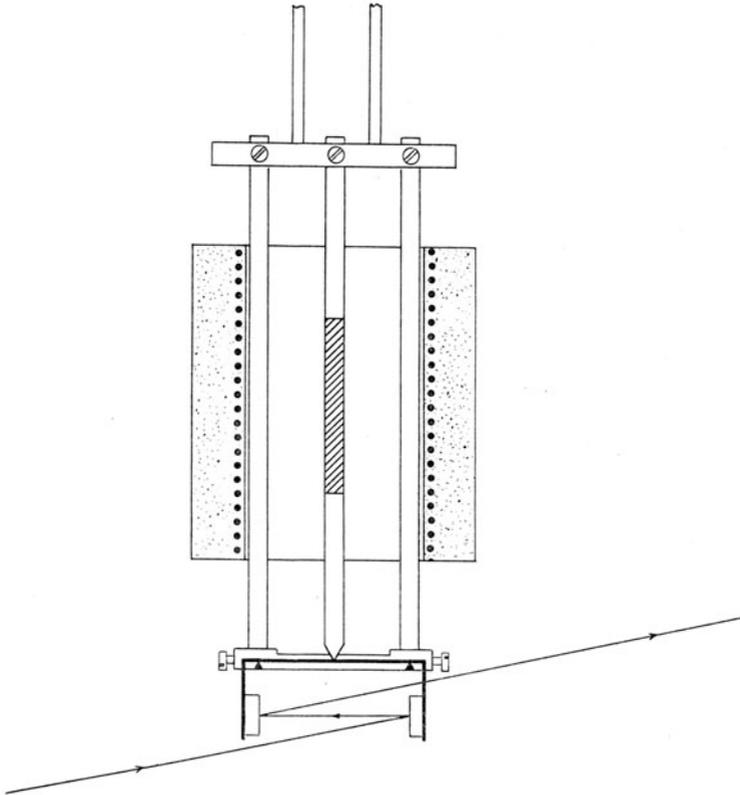


Abb. 18. Verfahren mittels Doppelspiegeln

eine besondere Form, offensichtlich um den Taster besser zu lagern, wie auch wohl um den Meßdruck herabzusetzen. Man versah die Proben an ihren beiden Stirnseiten mit Bohrungen, in welche die Quarzspitze  $K$  und die des Tasters  $S$  hereinragte. Es ist dann nötig, die „wirksame Länge“ zu kennen; dazu ist ein besonderer Längentaster (Weidert) konstruiert worden. Besondere Vorteile bietet diese Formgebung nicht.

Die Einrichtungen von Jones, sowie von Goetz, Buchta und Ho [33] sind analog.

Koerner und Salmang [34] lassen den Taster auf einen Hebel wirken mit beweglich eingehängtem Spiegel. Letztere reflektiert das Licht einer über ihm befindlichen Lampe auf eine Skale; die derart kreisförmig gebogen ist, daß der Spiegel Kreismittelpunkt ist. Diese Anordnung wird am besten vorher geeicht.

Es ist auch vorgeschlagen (Williams [35]), den Taster über eine Welle laufen zu lassen, die beim Ausdehnen des Versuchsstabes gedreht

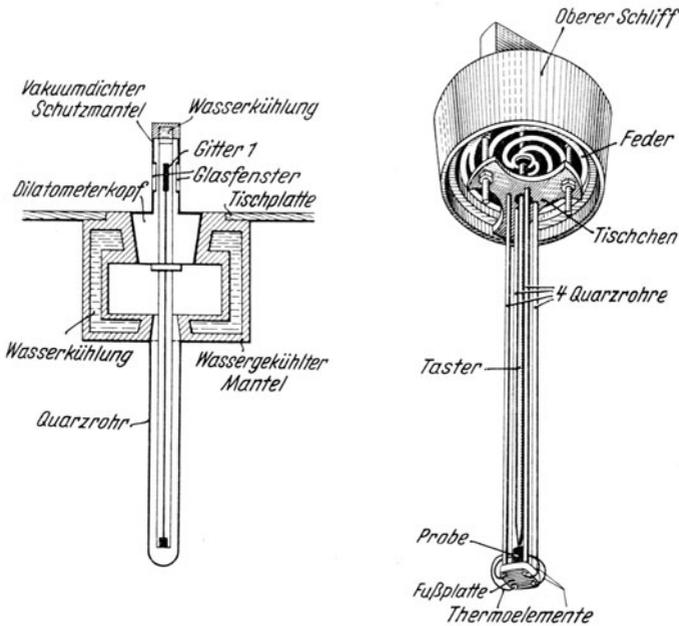


Abb. 19. Vorrichtung mit Lichtabblendung (Vakuum)

wird. Ein mit ihr verbundener Spiegel lenkt dann einen Lichtstrahl ab und erlaubt so die Wärmeausdehnung zu bestimmen. Auch diese Anordnung bedarf vor dem Gebrauch der Eichung.

Nach Art der Königschen Doppelspiegelmethode messen Borelius und Johansson [36] (s. Abb. 18) die Tasterbewegung, indem sie ihn auf einen Messingstreifen wirken ließen, der auf zwei nahe beieinander liegenden Schneiden ruht. Die freien Enden dieses Streifens sind nach unten gebogen und tragen gegeneinander gerichtete kleine Glasprismen, die als Spiegel dienen. Bei Änderung der Länge des Probestabes wird

der Taster bewegt und drückt den Messingstreifen herunter. Dadurch ändert sich der Winkel zwischen den beiden Spiegeln. Das wird mittels Skale und Fernrohr festgestellt und dadurch nach vorangegangener Eichung die Wärmeausdehnung gemessen. Eine andere, aber ebenfalls optische Möglichkeit hat Lange [37] benutzt. Auf dem Kopf des Tasters befindet sich ein kleines Strichgitter aus Glas (geteilte Fläche  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ , Gitterkonstante 0,4 mm, s. Abb. 19); die Striche sind mit schwarzer Tusche undurchsichtig eingefärbt. Von diesem Gitter wird mittels einer Kleinkinlampe (s. Abb. 20) und eines Lichtsammlers in fünf-facher Vergrößerung ein Bild auf ein zweites Gitter geworfen. „Die Gitterkonstante von 2 entspricht genau der Gitterkonstanten des vergrößerten Bildes von 1, das Gitter 2 wird daher am besten auf

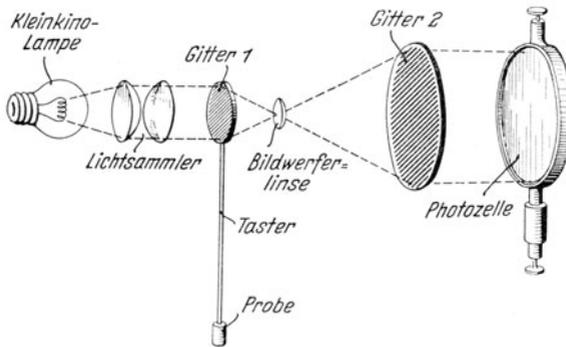


Abb. 20. Optische Einrichtung für Abb. 19

photographischem Wege hergestellt. Hinter diesem ist eine Photozelle angeordnet. Die Gitterstriche von 1 sollen nach Möglichkeit halb so dick sein wie deine Gitterkonstante. Ist dies nicht ganz der Fall, so wird als zweites Gitter das negativ vergrößerte Bild von 1 verwendet. Die Strichrichtung der Gitter steht senkrecht zur Richtung des Tasters. Das Gitter 2 ist senkrecht zur Strichrichtung mit einem Mikrometertrieb verstellbar. Wird nun durch die Ausdehnung der Probe das Gitter 1 angehoben, so bewegt sich auch sein auf das Gitter 2 entworfenes Bild über dieses Gitter hinweg. Es sei angenommen, daß in der Anfangsstellung die Bilder der Gitterstriche von 1 genau in die Gitterlücke von 2 fallen. Das durch das Gitter durchtretende Licht wird dann vollständig vom Gitter 2 abgefangen, die Belichtung der Photozelle ist am kleinsten. Decken sich dagegen die Bilder der Gitterstriche von 1 mit der von 2, so tritt alles durch 1 gehende Licht auch durch 2;

die Photozelle wird am stärksten belichtet. Wird also das Gitter durch die Ausdehnung der Probe aus der Anfangsstellung um seine Strichstärke angehoben, so steigt die auf die Photozelle fallende Lichtmenge gleichmäßig vom kleinsten auf den größten Betrag an. Da der Photostrom der Lichtmenge verhältnismäßig ist, gibt die mit einem geeigneten Galvanometer gemessene Stromstärke unmittelbar die Ausdehnung der Probe an.

Bei einer Probelänge von 6 mm und Temperaturen zwischen 0 und 1000° kann mit einem Höchstbetrag der Probenausdehnung von etwa 0,1 mm gerechnet werden. Um sicher zu gehen, daß eine einwandfrei verhältnismäßige Übertragung erfolgt, wurde das Strichgitter mit einer Strichstärke von 0,2 mm und einer Gitterkonstanten von 0,4 mm gewählt. Die Wahl eines Gitters 1 mit kleinerer Gitterkonstanten würde die erfaßbare Meßlänge im Verhältnis der Gitterkonstanten verkleinern und die Empfindlichkeit erhöhen.

Geeicht wird das Gerät mit Hilfe des Gitters 2. Durch Ausmessen beider Gitter in einem Komparator wurden die beiden Gitterkonstanten und die Vergrößerung des Bildwerfers bestimmt. Eine gleiche Änderung des Photostromes kann nun sowohl durch eine Verschiebung  $v$  des Gitters 1 als auch durch eine Verschiebung  $\alpha \cdot v$  des Gitters 2 in entgegengesetzter Richtung erfolgen. Zur Eichung ist es somit nur notwendig, das Gitter 2 mit dem Mikrometertrieb um einen bestimmten Wert  $w$  in mm zu verstellen und die zugehörige Änderung des Photostromes zu bestimmen. Dieselbe Änderung des Photostromes würde dann eine Längenänderung der Probe (in entgegengesetzter Richtung) im Betrage von  $w/\alpha$  bewirkt werden.“

Als Photozelle eignet sich eine Vakuumphotozelle mit Gleichstromverstärker nach Müller oder das Photoelement der Fa. S. A. F., Nürnberg, Ausführung  $D$ , ohne Verstärker. Letzteres ist auch als Differential-element verfügbar. Dieses Element ist in Verbindung mit all jenen Anordnungen zu benutzen, die einen Lichtstrahl mittels Spiegel ablenken.

Zur Aufzeichnung von Ausdehnung und Temperatur dient ein Koordinatenschreiber der Fa. Siemens & Halske. Diese Langesche Anordnung hat noch die Besonderheit, unter Vakuum gesetzt werden zu können. Dazu ist die äußere Quarzröhre, sowie der Dilatometerkopf mit Probe und Taster in einen wassergekühlten Mantel mittels je eines Schliffes einsetzbar.

Der Langeschen Anordnung ähnlich ist die von Rosenbohm [38], der statt der Photozelle eine Mollsche Thermosäule benutzt.

γ) Die Übertragung der Wärmeausdehnung in elektrisches Maß hat den Vorteil, die Empfindlichkeit sehr steigern zu können.

γ<sub>1</sub>) Elektrisch übersetzt wird mit Hilfe einer Brücke nach Art des von Sell angegebenen Düsenbolometers [39].

„Die Brücke besteht aus vier Wendeln aus Nickeldraht, die in geringem Abstände parallel zueinander in einem Rähmchen befestigt sind. Sie sind so zu einer Brückenschaltung vereinigt, daß nebeneinanderliegende Wendel entgegengesetzte Zweige der Brücke bilden. Die Brücke wird durch einen Akku von 4 V auf etwa 300° aufgeheizt. Die Temperatur stellt sich nach Einschalten des Meßstromes im Wärmeaustausch mit der umgebenden Hülle sehr schnell ein. Dieser Wärmeaustausch wird durch eine Doppelfahne gesteuert, auf die sich die zu messende Ausdehnung der Probe durch eine Schubstange überträgt.

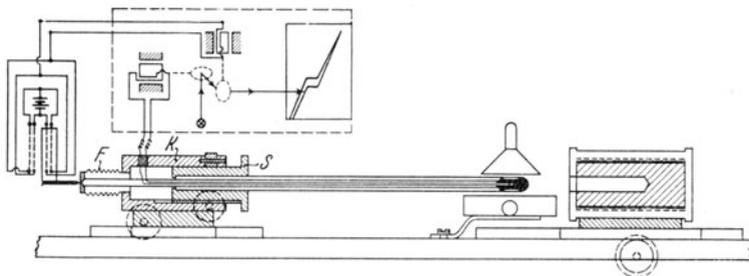


Abb. 21. Ausdehnungsschreiber mit elektrischer Übersetzung und optischer Aufzeichnung

Die Ausdehnung der Probe wird so in Temperaturänderungen und über diese in Widerstandsänderungen der Meßbrücke umgewandelt. Die Abmessungen der Brücke und der Steuerfahne sind so gewählt, daß lineare Ausdehnungen sich in lineare Spannungsänderungen an den Meßklemmen der Brücke umsetzen. Die Charakteristik der Brücke wird im linearen Teil ausgenutzt. Das ist bei Verwendung kleiner Proben etwa 1,5 cm lang leicht möglich.

Die Steuerfahne ist seitlich in einem kleinen Metallklotz befestigt, der an vier Blattfedern hängt. Die Eigenschwingungen dieses Systems beträgt etwa 0,2 s. Die thermische Trägheit der Brücke ist so klein, daß sie neben der mechanischen nicht ins Gewicht fällt. Das Gerät ist daher auch zur Aufnahme schnell ablaufender Vorgänge geeignet.

Die Meßbrücke ist bei ausreichender Abschirmung äußerer Temperatureinflüsse nur unwesentlich störungsanfällig.“

Abb. 21 zeigt den Aufbau des Ausdehnungsmessers mit photographischer Eigenaufzeichnung.

$\gamma_2$ ) Eine weitere elektrische Möglichkeit, die Bewegung des Tasters zu messen, ist die kapazitative. Das äußere Quarzrohr trägt am offenen Ende die eine Kondensatorplatte und der Taster die andere. Zwecks weiterer Vergrößerung wird auch eine Hebelsübersetzung eingebaut. Die eine Kondensatorplatte ist am langen Hebelsende angebracht [40]. Die Schneiden mußten sorgfältig gelagert werden. Einen besonderen Meßkondensator empfehlen Heinz und Kottas [39]. In einem geerdeten Gehäuse (*a*) befinden sich die Kondensatorplatten *b* und *d* (Abb. 22), die auf Isolierfüßen *e* und *f* ruhen, die Mittelplatte *c* — mit *a* elektrisch verbunden, also auch geerdet — lagert mit der einen Seite auf einer Schneide, mit der anderen auf dem Taster. Der Angriffspunkt *h* läßt sich je nach der gewünschten Vergrößerung wählen (prak-

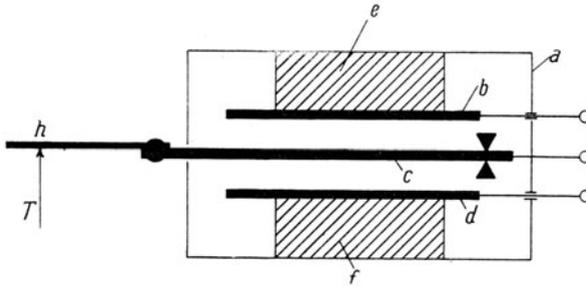


Abb. 22. Meßkondensator: *a* Gehäuse, *b* und *d* Kondensatorplatte, *c* Mittelplatte, *h* Angriffspunkt des Tasters *T*, *e* und *f* Isolierungen

tisch begrenzt durch die mechanische Drehbewegung der Platte). Die Kapazitätsänderung durch Bewegen des Tasters wird über Schwingungskreise der Messung zugänglich gemacht [42].

Nach dem Prinzip des unverstimmten Schwingungskreises (siehe Abb. 23) (charakterisiert durch das Vorhandensein nur eines Wechselstromgenerators konstanter Frequenz, der auf einen elektrischen Schwingungskreis veränderlicher Abstimmung einwirkt), ist es möglich, eine Anordnung zu bauen, die den Zusammenhang zwischen den Tasterverschiebungen und den Ablesungen am Instrument linear wiedergibt. Die Platten *b* und *c* (Abb. 22) bilden den Kondensator 3, *c* und *d* den Kondensator 4 im Schaltbild 23. Meßbereich kann durch Änderung der Generatorfrequenz, durch andere Wahl des Angriffspunktes *h* (siehe Abb. 22) und durch Empfindlichkeitsänderung des Anzeigegerätes 10 (Abb. 23) eingestellt werden. Zur Kontrolle des Nullpunktes wird über einen Umschalter ein Differentialkondensator als Eichkondensator

eingeschaltet, der die gleichen elektrischen Werte wie der Meßkondensator hat.

Die Empfindlichkeit läßt sich beträchtlich steigern, wenn als Resonanzkreis ein quarzgesteuerter Kreis verwendet wird (Messung von Verschiebungen bis zu  $10^{-10}$  cm möglich [43]).

δ) Weiter sollen beim Rohrverfahren noch zwei Besonderheiten erwähnt werden. 1. Äußeres Quarzrohr- und Taster vertauschen ihre Rolle, die ganze Anordnung wird um  $180^\circ$  gedreht (44). Dann wird der Taster festgehalten, das äußere Quarzrohr hängt an Schneiden, deren Verhalten bei Temperaturänderung durch eine besondere Eichung berücksichtigt werden muß;

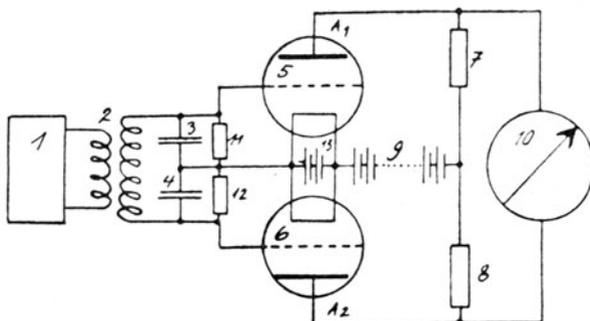


Abb. 23. Prinzip des unverstimmten Schwingungskreises: 1 Wechselstromgenerator, 2 Transformator, 3 und 4 kapazitive Widerstände, parallel zur Gitter-Kathodenstrecke je einer Elektronenröhre 5 und 6, deren Anoden über den angepaßten Widerständen 7 und 8 an dem Pluspol der Anodenspannungsquelle 9 liegen, 10 Anzeigergerät als Brückeninstrument, 11 und 12 hochohmige Widerstände, 13 Heizstromquelle,  $A_1$  und  $A_2$  Stellen gleichen Potentials bei Beginn des Versuchs bei Unsymmetrischwerden von 3 und 4 Potentialunterschied, 10 schlägt aus

2. kann der Taster — in der normalen Stellung — verlängert, mit einem Teller versehen und so zum Tragen von Gewichten verwendet werden [45]. Mit dieser Anordnung ist es dann möglich, die Wärmeausdehnung des Probestabes in Abhängigkeit von der Belastung zu beobachten.

b) Es ist auch ein besonderes mittelbares Verfahren mit Hilfe der Lichtinterferenz ausgearbeitet worden (Priest [46]). Ihr liegt die schon von Pulfrich festgestellte Tatsache zugrunde, daß die Anzahl von Interferenzstreifen, die zwischen zwei festen Geraden auf

einer der spiegelnden Flächen liegen, ein Maß für die Neigung der beiden spiegelnden Flächen bildet.

Der Hauptteil des Gerätes ist in Abb. 24 wiedergegeben. Die plangeschliffene Deckplatte ruht auf einer Schneide  $SS$  der besonders geformten Grundplatte (meist aus Quarz) und einer Spitze  $X$  des Probekörpers. Bei Beleuchtung mit monochromatischem Licht er-

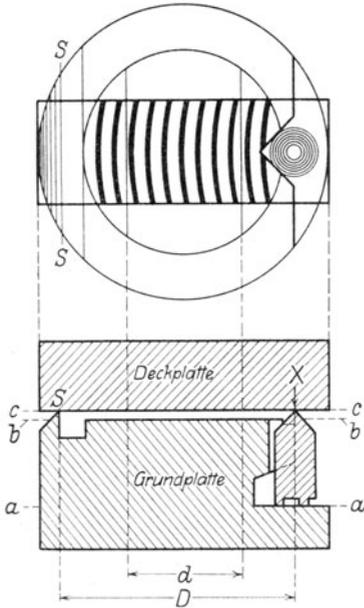


Abb. 24. Mittelbare Interferenzverfahren:  $SS$  Schneide,  $X$  Spitze des Versuchsstückes,  $D$  Abstand  $SS-X$ ,  $d$  Abstand der beiden festen Striche,  $a-a$  Aufsatzfläche des Versuchsstückes,  $b-b$  Ebene der Grundplatte,  $c-c$  untere Fläche der Deckplatte

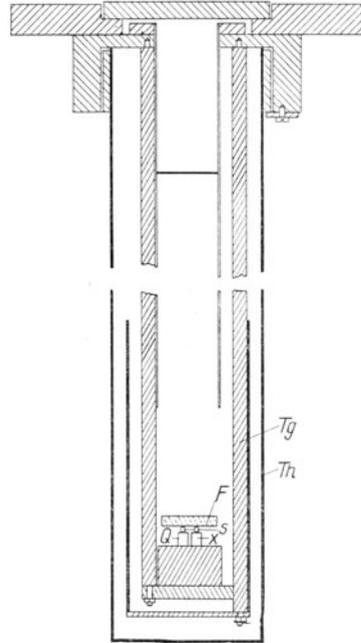


Abb. 25. Dreifußverfahren mit Lichtablenkung:  $F$  Deckplatte,  $s$  Stahlkugel,  $x$  Versuchsstück,  $Q$  Quarzsäulen,  $Tg$  Traggestüt,  $Th$  Thermostat

scheinen zwischen der Grundplattenoberfläche  $bb$  und der Deckplattenfläche  $cc$  parallel  $SS$  Interferenzstreifen. Diese sind schwach gegen  $X$  konkav oder konvex gekrümmt, je nachdem die Spitze über oder unter dem der Schneidenhöhe liegt. Auf  $bb$  befinden sich zwei zu sich und zu  $SS$  parallele Geraden um  $d$  voneinander entfernt.

Ändert sich nun infolge Temperaturänderung die Länge des Probekörpers gegenüber der Schneidenhöhe, so ändert sich die Neigung der beiden Platten zueinander, mithin auch die Anzahl der Streifenbreiten

zwischen den Strichmarken (Änderung um  $z$ , das richtige Vorzeichen ist an der Krümmung der Streifen zu erkennen). Die Längenänderung des Probekörpers gegenüber dem Vergleichsstoff ist dann, wenn  $\lambda$  die benutzte Wellenlänge ist,

$$(8) \quad l - l_0 = \frac{D}{d} \frac{\lambda}{2} \cdot z.$$

Das um die bekannte, für den Stoff der Grundplatte zu errechnende Ausdehnung im gleichen Temperaturbereich vermehrt und durch Ausgangslänge, sowie Temperaturdifferenz dividiert, ergibt den Wärmeausdehnungskoeffizienten.

c) Da das Arbeiten mit Interferenzen häufig nicht erwünscht oder überhaupt unmöglich ist, kann die Neigung auch geometrisch-optisch durch Spiegel und Skale gemessen werden (Roberts [47]). Legt man z. B. eine plane Platte teils durchlässig, teils versilbert auf drei Stützen (unter Zwischenlegen von Stahlkugeln), von denen zwei aus dem gleichen Stoff bekannter Wärmeausdehnung, die dritte aus dem zu untersuchenden sind, und entwirft das Bild eines Strichgitters sowohl auf den versilberten Teil, wie auch auf die die Stützen tragende Grundfläche (s. Abb. 23), so läßt sich — mittels Fernrohr beobachtet — aus der Verschiebung ( $e$ ) der beiden Gitter gegeneinander die lineare Änderung des Probekörpers gegenüber dem Versuchskörper errechnen, wenn der senkrechte Abstand des Probekörpers von der Verbindungslinie der beiden anderen Stützen gleich  $f$ , die Entfernung (Objektiv — Platte  $F$ ) und  $E$  (ein Eichfaktor zur Umrechnung in cm) ist, so gilt

$$(9) \quad \frac{l_1 - l_2}{f} = \frac{e}{2E \cdot F}.$$

Daraus, wie bei vorher beschriebenem Gerät ausgeführt, der Ausdehnungskoeffizient;  $f$  muß parallel der Fernrohrachse sein.

d) Eine beachtliche Genauigkeit erreicht man bei der Messung der Wärmeausdehnung, wenn man durch Vergleich mit einem bereits bekannten Stoff den Probestab untersucht, zu diesem Zweck beide nebeneinander anordnet und die Stücke mit Tastern versieht, die jeder eine Schneide tragen. Auf beiden Schneiden ruht ein Waagebalken (Reich [48]), der in der Mitte zwischen jenen auf der den Probekörpern abgewendeten Seite (also von oben her) durch eine dritte Schneide gehalten wird. Dadurch ist dem System der Drehpunkt gegeben (siehe

Abb. 26). Die Länge des Waagebalkens ist eine für die Vergrößerung des Systems mitverantwortliche Größe. Bei Temperaturänderung und verschiedener Ausdehnung der Stäbe ist der Höhenunterschied der Waagebalkenenden ein Maß für die Ausdehnung des unbekanntes Stoffes gegen den mit bekannter Ausdehnung. Die Strecken  $AB$  und  $A_1B_1$  sind durch besondere Messung vor dem Aufbau des Gerätes zu messen. Ein zusätzliches optisches Gerät aus horizontal zu stellender Grundlinie,

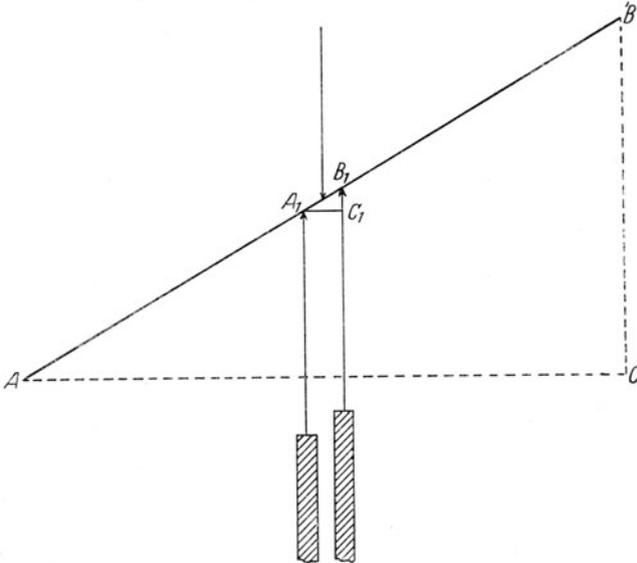


Abb. 26. Einrichtung mit Waagebalken:  
 $AB : A_1B_1 =$  Übersetzungsverhältnis,  $B_1C_1 =$  Verlängerung ( $l - l_0$ )

sowie senkrecht auf der Grundlinie stehenden und auf ihr verschiebbar angeordneten Mikroskopen mit Okularmikrometern gestattet den Höhenunterschied  $BC$  zu messen. Eine einfache geometrische Überlegung führt zur Berechnung der Strecke  $B_1C_1$ , die angibt, um wieviel der eine Stab sich mehr ausdehnt als der andere.

e) Für die Messung der Wärmeausdehnung von Drähten eignet sich ein von Retzow [49] angegebenes Verfahren. Ein Metalldraht wird zwischen zwei festliegenden Klemmen ausgespannt und in der Mitte durch ein kleines Gewicht belastet, so daß die Drahtenden und der Aufhängepunkt des Gewichtes ein gleichschenkliges Dreieck bilden.

Bei Temperaturänderung senkt sich das mit einer Meßmarke versehene Belastungsgewicht um einen wiederum mit Mikroskop zu bestimmenden Betrag. Sind unbelastete Länge, die Durchhängung vor und nach der Temperaturveränderung (erzeugt mittels elektrischen Stromes durch den Draht) durch Messung bekannt, ist die Ausdehnung des Drahtes unter Anwendung bekannter Lehrsätze über das rechtwinklige Dreieck zu berechnen. In diesem Sinne wäre das Verfahren ein unmittelbares. Wegen unkontrollierbarer Verhältnisse aber, die auftreten können (z. B. Luftströmung), empfiehlt sich eine vorherige Eichung mit einem Draht bekannter Ausdehnung.

Wärmetechnisch etwas besser und darüber hinaus auch für elektrisch nichtleitende Stoffe brauchbar ist das von Selenyi und Polai [50] gebaute Gerät. In zwei auf einer Seite bis auf ein kleines Loch geschlossenen Quarzrohren wird, nachdem beide mit der feinen Öffnung nach oben ineinander gesteckt sind, der zu untersuchende Draht durchgezogen und so verknotet oder befestigt, daß das innere Rohr am Draht, der am äußeren fest sitzt, hängt. Bei festmontiertem äußeren Rohr kann die durch Temperaturänderung auftretende Lageänderung des inneren Rohres nach einer der vielen besprochenen Weise gemessen werden. Selenyi und Polai tun das, indem sie das Ende des inneren Rohres mit einer Spitze versehen und dieser einen Spiegel gegenüber stellen. Der Abstand Nadel-Spiegelbild wird mikroskopisch bestimmt.

f) Bei Gläsern ist, worauf bereits Schott hingewiesen hat, die relative Ausdehnung zweier Glassorten bestimmbar, indem aus beiden ein Bistreifen hergestellt wird [51]. Die Durchbiegung dieses Bistrefiens hängt von der Dicke der Einzelteile und ihrem verschiedenen Ausdehnungsverhalten ab. Es empfiehlt sich ein Eichschema aufzustellen, wobei am besten Fäden von 0,1 bis 0,3 mm Dicke verwendet werden.

g) Wärmeausdehnungsbestimmungen bei hohen Drucken sind besonders schwierig, weil im Innern eines auf viele tausend Atmosphären gedrückten Zylinders Längen bestimmt und dazu die Temperaturen verändert werden sollen. Grundsätzlich wird bei höheren Drucken so verfahren, daß die Längenänderungen unter Druck (also die Kompressibilität) bestimmt werden. Das geschieht bei verschiedenen Temperaturen, so daß man die Abhängigkeit vom Druck die entsprechenden Längenänderungen bei konstanten Temperaturen (Isothermen) darstellen kann. Aus diesen Werten gewinnt man den Ausdehnungs-

koeffizienten, indem man bei konstantem Druck die zu den verschiedenen Isothermen gehörigen Längenwerte feststellt; daraus läßt sich der Wärmeausdehnungskoeffizient bei verschiedenen Drucken bestimmen.

Verfahrensmäßig gibt es verschiedene Möglichkeiten, von denen drei kurz erwähnt werden sollen. Es sind Kompressibilitätsbestimmungen, die zum Zwecke der Wärmeausdehnung bei verschiedenen Temperaturen ausgeführt werden müssen.

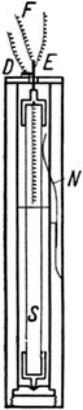


Abb. 27.  
Einrichtung für hohe Drucke:  
*FN* Stromführung,  
*DE* Spannungsdrahte,  
*S* Versuchsstück

Soweit es die Temperatur- und Druckverhältnisse erlauben, ist das Komparatorverfahren anzuwenden, wobei der Druckzylinder Fenster erhält [52]. Alsdann sind meßtechnisch die Dinge die gleichen, wie oben beim Komparatorverfahren. Es ist auch vorgeschlagen worden, den zu untersuchenden Stab — an einem Ende in der Druckapparatur fest gelagert — an seinem anderen Ende mit einem Ring zu versehen. Letzterer wird durch einen Anschlag (am einschließenden Mantel befindlich) daran gehindert, beim Zusammendrücken den Bewegungen des Stabes zu folgen; nach Entlastung aber wird er durch Reibung mitgenommen. Die nach Öffnen der Apparatur gemessene Lageveränderung des Ringes ist die durch Druck bedingte; das wird bei verschiedenen Temperaturen wiederholt; die Änderung des Mantels muß

besonders bestimmt werden [53]. Da ein solches Verfahren weniger genau und sehr zeitraubend ist, wurde eine kontinuierliche Beobachtung der Längenänderung ermöglicht, indem der zu untersuchende Stab *S* (s. Abb. 27) bei guter Halterung am frei beweglichen Ende oder ein Taster auf ihm einen Draht mit hohem elektrischen Widerstand enthält. Die Längenänderung wird durch Widerstandsbestimmung zwischen dem Schleifkontakt *D* und dem Punkt *E* gemessen. Das ganze befindet sich in der Druckapparatur und dem Thermostaten.

## 2. Kapitel: Kubische (Volumen-)Ausdehnung

### I. Über unmittelbare Verfahren

Die Volumenausdehnung fester Körper ist unmittelbar noch nicht gemessen worden. Sie läßt sich, wie bereits erwähnt, aus der linearen berechnen, wenn man den Kristalltyp des betreffenden Stoffes kennt.

Es ist bei homogenen Stoffen hinreichend, drei aufeinander senkrecht stehende Richtungen zu betrachten, die mit den kristallographischen Achsen in Beziehung stehen. Diese drei Richtungen werden im allgemeinen bei Temperaturänderung ihre Lage im Raum verändern, müssen aber nach der Deformation wieder in ihre ursprüngliche Lage zueinander zurückkehren (Hauptachsen des Deformationsellipsoides, thermische Achsen) (1).  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  nennt man die Hauptausdehnungskoeffizienten. Es gilt für reguläre Körper  $\gamma = 3 \alpha$ , für hexagonale, trigonale und tetragonale Kristalle

$$(10a) \quad \gamma = 2 \alpha_x + \alpha_z,$$

für rhombische, monokline und triklone

$$(10b) \quad \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z = \gamma.$$

Wird in beliebiger Richtung beobachtet, die mit den thermischen Achsen die Winkel  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  bildet, so ist für sie der Ausdehnungskoeffizient

$$(10c) \quad \alpha = \alpha_x \cdot \cos^2 \varphi_x + \alpha_y \cdot \cos^2 \varphi_y + \alpha_z \cdot \cos^2 \varphi_z.$$

Insonderheit ergibt sich für das hexagonale, trigonale und tetragonale System

$$(10d) \quad \alpha = \alpha_x \cdot \sin^2 \varphi_x + \alpha_z \cdot \cos^2 \varphi_z.$$

Soll die Volumenausdehnung beobachtet werden, so würde grundsätzlich das röntgenographische Verfahren, das die Kenntnis der reflektierten Fläche voraussetzt, gewissermaßen ein unmittelbares sein, wobei Beobachtungen in mehreren Richtungen zugleich oder nacheinander notwendig wären. Eine unmittelbare Ausmessung des Volumens, wobei dem Stoff eine geometrisch bestimmbare Form zu geben wäre, auf Grund linearer Einzelabmessungen bietet nicht nur experimentelle Schwierigkeiten, sondern ist schon bei gewöhnlicher Temperatur sehr ungenau. Mithin werden diese Möglichkeiten kaum einen erfolgreichen Weg der Volumen-Ausdehnungsmessung fester Körper ergeben.

## II. Über mittelbare Verfahren

Alle übrigen Verfahren aber — es handelt sich um mittelbare — sind die gleichen, wie sie bei der Bestimmung der Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten verwendet werden. Es erübrigt sich daher, die Verfahren zur Bestimmung der Volumenausdehnung fester Körper gesondert zu behandeln. Es genügt vielmehr, auf den folgenden Abschnitt zu verweisen, der die entsprechenden Verfahren für Flüssigkeiten behandelt.

## 2. Abschnitt: Flüssigkeiten

Die Eigenart des flüssigen Zustandes bedingt bei der Wärmeausdehnung, daß von einer Flüssigkeit nur die Volumenausdehnung gemessen werden kann; da eine Flüssigkeit stets von einem festen Körper umschlossen sein muß, ist die Volumenausdehnung (und deren Bestimmung) von Flüssigkeiten und festen Körpern zwangsläufig miteinander verknüpft. Es ist dann also notwendig, daß das Verhalten in Abhängigkeit von der Temperatur des einen Stoffes bekannt sein muß, wenn man das des anderen bestimmen will. So ergibt sie klar, daß die Verfahren beider zusammen zu behandeln sind.

Diese Verknüpfung würde praktisch bedeuten, es müßte allein die Bestimmung des linearen Verhaltens fester Körper und die sich daraus ergebende Berechnung des kubischen Verhaltens die einzige Grundlage für die Verfahren dieses Abschnittes sein, gäbe es nicht eine Möglichkeit, die Volumenausdehnung der Flüssigkeiten unmittelbar zu messen.

### I. Unmittelbare Verfahren

a) Dieses Verfahren geht auf Dulong-Petit (1818) zurück. Es beruht auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren und hat mit den meisten dieses Abschnittes die Eigentümlichkeit gemeinsam, daß es erst auf dem Wege über die Dichtebestimmung möglich ist, die Wärmeausdehnung zu messen. Da sich bei Temperaturänderung die Masse des zu untersuchenden Stoffes — Verdampfung ausgeschaltet — nicht ändert, so ist der Temperaturkoeffizient der Dichte der gleiche, wie der des Volumens. Es besteht mithin die Beziehung

$$(11) \quad \gamma = \frac{V - V_0}{V_0(t - t_0)} = \frac{s_0 - s}{s(t - t_0)}.$$

Beim Verfahren auf Grund der kommunizierenden Röhren nun wird die Schwere zweier verschieden erwärmter kommunizierender Flüssigkeitssäulen desselben Stoffes miteinander verglichen. Es werden also die beiden Schenkel eines U-förmigen Manometers mit der gleichen Flüssigkeit gefüllt, aber auf verschiedener Temperatur gehalten. Werden die Flüssigkeitshöhen über dem horizontalen Verbindungsstück ge-

messen ( $h$  und  $h_0$ ), so verhält sich nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren  $s : s_0 = h_0 : h$  oder

$$\frac{s_0 - s}{s} = \frac{h - h_0}{h_0},$$

d. h.

$$(12) \quad \gamma = \frac{h - h_0}{h_0 (t - t_0)}.$$

Die praktische Durchführung solcher Versuche ist recht schwierig. Daraus erklärt sich auch die Tatsache, daß das Verfahren nur in vereinzelten Fällen (beim Quecksilber und beim Wasser) zu Präzisionsmessungen herangezogen wurde. Abb. 28 zeigt schematisch die Anordnung für die Versuche mit Wasser. Die beiden Schenkel sind am oberen miteinander unmittelbar verbunden und unten durch ein Differentialmanometer; mit letzterem wird die Differenz  $h - h_0$  gemessen. Alsdann muß noch der Abstand der Kuppenhöhe im Manometer von der oberen Verbindungsleitung an dem Schenkel gemessen werden, dessen Temperatur während des Versuchs konstant gehalten wird. Es empfiehlt sich zur Ausschaltung von Unsymmetrien die Apparatur so einzurichten, daß man die Schenkel wechselweise — einmal den rechten, einmal den linken — erwärmen kann [55].

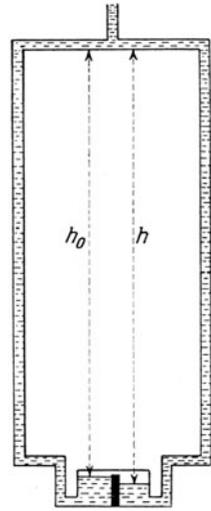


Abb. 28.  
Verfahren der kommunizierenden Röhren

b) Für die Ausdehnungsbestimmung von Ölen ist auf diesem Prinzip beruhend eine Apparatur entwickelt worden [56]. Zwischen den beiden Schenkeln ist ein dritter gesetzt worden, der ganz mit der zu untersuchenden Flüssigkeit und einem in seiner Eintauchtiefe verstellbaren Thermometer ausgefüllt ist. Weiter werden in den beiden Schenkeln zwei Spitzen in verschiedener Höhe eingebaut, deren Abstand als Apparatekonstante vorher bestimmt wird und  $h$  sein möge. Der Schenkel mit der tiefgelegenen Spitze erhält eine Leitung, die die Apparatur mit einem U-Rohr-Manometer und einer pneumatischen Vorrichtung — beide außerhalb des Thermostaten — verbindet. Nun wird bei verschiedenen Temperaturen mit Hilfe der pneumatischen Einrichtung die Flüssigkeit in den Schenkeln so eingestellt, daß in beiden die Flüssigkeitskuppen gerade

die Spitzen berühren; gegebenenfalls muß die Eintauchtiefe des im (dritten) Hilfsschenkel befindlichen Thermometers entsprechend geändert werden. Ist das erreicht, so wird der Stand des Manometers abgelesen ( $a$ ). Es ist dann

$$(13) \quad \gamma' = \frac{a_0 - a}{a(t - t_0)}$$

der Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit relativ zu dem Baustoff, aus dem die Spitzenträger hergestellt sind. Am besten wird in einem Leerversuch die Abstandsänderung der Spitzen mit der Temperatur gesondert bestimmt und dann gleich bei der Ablesung des Manometers berücksichtigt. Die Meßunsicherheit der Anordnung beträgt etwa 1 bis 2 %.

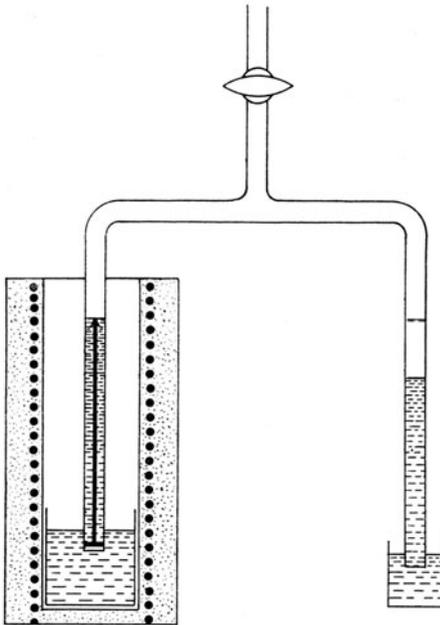


Abb. 29. Verfahren wie Abb. 28 mit nach unten geöffneten Röhren

Grundsätzlich wäre es auch möglich, die beiden kommunizierenden Schenkel durch ein oberes gasenthaltendes Rohr miteinander zu verbinden. Tauchen dann die nach unten offenen Schenkel je in ein Vorratsgefäß und wird (Abb. 29) durch ein Ansatzstück der Verbindungsleitung in beiden Schenkeln der gleiche Druck hergestellt, so gelten für die abgelesenen Flüssigkeitshöhen dieselbe Gleichung, wie am Anfang des Abschnittes auseinandergesetzt wurde. Es wäre dann auch möglich, in

dem Schenkel, dessen Temperatur verändert wird, besondere Einrichtungen zur Ablesung der Flüssigkeitshöhe (etwa auch eine Spitze) einzubauen.

## II. Mittelbare Verfahren

a) Die hydrostatischen Verfahren — bei Anwendung auf Flüssigkeiten auch Schwimmer-, auf feste Körper Auftriebsverfahren

genannt — haben ihre Grundlage im Archimedesschen Prinzip. Wird ein Körper in eine Flüssigkeit eingetaucht, so erleidet er einen Gewichtsverlust, der so groß ist, wie ein gleiches Volumen der Flüssigkeit wiegt. Ist  $G_l$  das Gewicht des festen (Eintauch-) Körpers in Luft,  $G_{s_0}$  in der

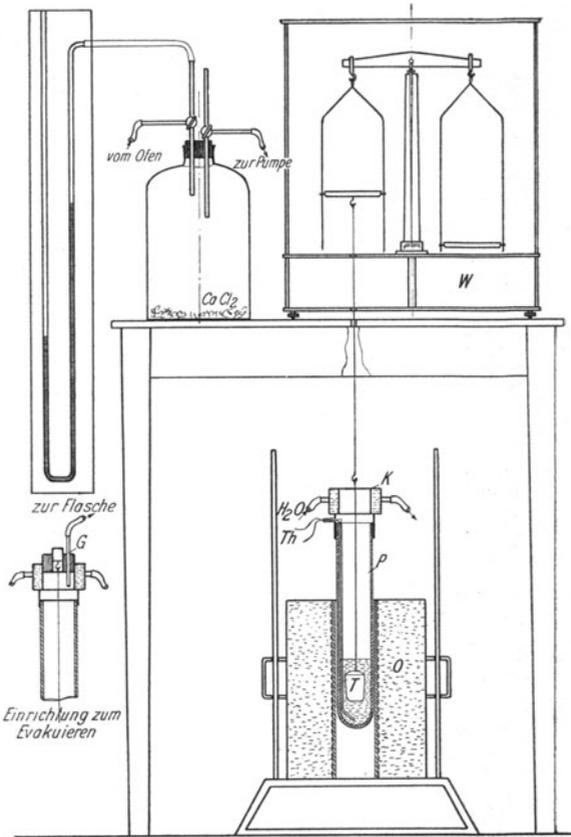


Abb. 30. Auftriebsverfahren:  $G$  Gummistopfen,  $K$  Kühlmantel,  $O$  Ofen,  $P$  Porzellantiegel,  $T$  Platintiegel,  $Th$  Thermoelement,  $W$  Waage

Schmelze bei  $t_0$  und  $G_s$  bei  $t^0$ , so sei  $G_l - G_s = m$  und  $G_l - G_{s_0} = m_0$ . Dann stehen die Ausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit  $\gamma_{fl}$  und des eintauchenden Körpers  $\gamma_f$  in folgender Beziehung zueinander:

$$(14) \quad \gamma_{fl} \cdot m - \gamma_f \cdot m_0 = \frac{1}{t - t_0} (m_0 - m).$$

Daraus läßt sich jeweils die eine Größe  $\gamma$  bestimmen, wenn die andere bekannt ist.

Bei der praktischen Durchführung dieser Versuche müssen einige Besonderheiten beachtet werden. Abb. 30 zeigt die meist übliche Anordnung [37]. An der einen Seite einer technischen Analysenwaage hängt der Eintauchkörper, an der anderen wie bei der gewöhnlichen Anordnung eine Waagschale zur Aufnahme der Gewichtstücke. Dabei empfiehlt sich eine Vorrichtung, mit der man die Höhe des Waagebalkens verstellen kann. Es ist auch auf die Auswahl der Stoffe zu achten; Flüssigkeit und eintauchender Körper dürfen nicht miteinander reagieren (z. B. nicht lösen oder oxydieren). Beide müssen ferner frei von Luft und, soweit nicht Wasser selbst verwendet wird (also bei höheren Temperaturen), frei von Wasser sein. So wird auch häufig bei Untersuchung von Flüssigkeiten diese in einen besonderen Behälter getan und dann in eine besonders ausgesuchte Flüssigkeit getaucht. Es ist dann möglich, entweder den Auftrieb des Behälters mit der Flüssigkeit als eintauchenden Körper zu betrachten und die Ausdehnung der Flüssigkeit zu bestimmen oder in die zu untersuchende Flüssigkeit den Tauchkörper zu bringen, so daß die umgebende Flüssigkeit nur als Schutzflüssigkeit zu betrachten ist. Die Apparatur wird vor der Messung luftfrei gemacht, indem der eingetauchte Körper an einem Verschlusskonus aufgehängt wird, der zugleich die Durchlaßöffnung für den Draht zur Waage abschließt, dann wird evakuiert; danach der Konus wieder herausgenommen und der Eintauchkörper am Waagebalken aufgehängt. Bei Untersuchung von Flüssigkeiten eignen sich als Stoffe für die Tauchkörper Wolfram, Quarz, Platin und glasiertes Porzellan. Als Salzschmelzen werden genannt für das Temperaturgebiet  $380/700^{\circ}$  das eutektische Gemisch LiCl und KCl;  $700/1100^{\circ}$  NaCl und KCl zu gleichen Teilen und für  $800/1400^{\circ}$  reines NaCl. Als Schutzflüssigkeit bei Magnesium hat sich eine Mischung von 50% LiCl und 500% Elrasal [58] bewährt. Endlich ist auch der Einfluß der Oberflächenspannung auf den Aufhängedraht zu berücksichtigen.

$\alpha$ ) Für den besonderen Zweck, die Volumenänderung einer Umwandlung bei konstanter Temperatur zu beobachten, hat Matuyama [59] eine Thermowaage gebaut, die mit geringen Umänderungen auch für Volumenausdehnungsmessungen verwendbar wäre. Die Seite des Eintauchkörpers an der Waage bleibt, wie Abb. 30 links unten zeigte, unverändert, die andere Seite erhält unter der eigentlichen Waagschale zwei in eine Flüssigkeit eintauchende Dämpfungs-

scheiben, die am Boden des Flüssigkeitsbehälters mit einer Feder befestigt sind; die Bewegung des Waagebalkens wird mit Spiegel und Skale beobachtet. Ist  $S$  der durch besondere Versuche festgestellte Eichfaktor der Waage,  $W$  das Gewicht des Körpers in Luft — in der Nähe der Umwandlungstemperatur —,  $W_1$  die Belastung der Waage vor Einbringen des Tauchkörpers, damit der Nullpunkt der Waage erreicht wird,  $W_2$  nach dem Einbringen,  $\Delta$  der Ausschlag nach der Umwandlung, so ist die relative Volumenänderung

$$(15) \quad \frac{\delta V}{V} = \frac{S \cdot \Delta}{W - (W_2 - W_1)}$$

$\beta$ ) Es ist auch möglich, mit Schwebekörpern zu arbeiten. Es wird ein Glaskörper in Form einer größeren, etwas ovalen hergestellt. Man kann diese Glasblase allein oder mit einem hängenden Mikropyknometer benutzen. Die Glasblase wird in der Flüssigkeit durch Änderung des Gasdrucks über der Flüssigkeit zum Schweben gebracht. Es kann erreicht werden, daß eine Änderung des Druckes um 1 Dekatorr eine Änderung im Auftrieb von  $10^{-4}$  mg bedingt. Der Körper wird als schwebend betrachtet, wenn er — durch ein Fenster mit Mikroskop und Okularmikrometer beobachtet — weniger als  $1/100$  mm in 20 Minuten steigt oder fällt. Da Glas thermische Nachwirkung zeigt, ist eine häufigere Eichung oder die Verwendung von Quarz ratsam [60].

Für hohe Drucke und Temperaturen (benutzt bei Beobachtungen in der Nähe kritischer Punkte der Flüssigkeit) kann ein Schwimmersystem (z. B. aus Quarz mit eingeschmolzenem Eisenkern) in die zu untersuchende Flüssigkeit gebracht werden. Eine außerhalb angebrachte Magnetisierungsspule wird so mit elektrischem Strom beschickt, daß das Schwimmersystem (Volumen bei Ausgangstemperatur  $v_0$ , Dichte  $d_0$ ) gerade schwimmt (plötzliches Emporschnellen des Schwimmers). Es muß  $d_0 > d^{fl}$  der Flüssigkeit bei der höchsten Versuchstemperatur sein.  $v_0 d_0 - v_0 d_{t_0}^{fl}$  ist der Auftrieb ohne Magnetfeld; nach Erzeugen des Feldes (Stromstärke  $i_g$  beim Schweben des Schwimmers) ist  $v_0 d_0 = v_0 d_{t_0}^{fl} + \alpha_0 i_{g_0}^2$  ( $\alpha$  ist ein Eichfaktor, bei Atmosphärendruck und  $20^\circ$  C angenähert 0,038, wenn  $i_g$  in Ampere und die anderen Größen im CGS-System gemessen werden). Das für eine zweite Temperatur  $t$  ausgeführt, ergibt unter Vernachlässigung Glieder höherer Ordnung

$$(16) \quad \gamma_{fl}(v d - \alpha i_g^2) - \gamma_{fl}(v_0 d_0 - \alpha_0 i_{g_0}^2) = \frac{\alpha i_g^2 - \alpha_0 i_{g_0}^2}{t - t_0},$$

wo  $\gamma_f$  der Volumenausdehnungskoeffizient des Stoffes ist, aus dem der Schwimmer besteht.

Zu beachten ist, daß Glas wegen der thermischen Nachwirkungserscheinungen auch hier ungünstig ist, magnetische Störungen der Spule, sowie des eingeschmolzenen Eisenstückes auftreten können. Damit die Heizung magnetisch nicht stört, ist eine bifilare Wicklung und durch besondere Schaltung das Aussetzen des Heizstromes während der kurzen Meßzeit ratsam [61].

b) Die nächste Gruppe der Verfahren, die ebenfalls bei der Dichtebestimmung eine Rolle spielt, geht unmittelbarer auf das Volumen selbst zurück; man könnte sie als die thermometrischen zusammenfassen. Es sind dies Verfahren, die mit geschlossenem, offenem oder Überlaufgefäß arbeiten, sowie jene auf Grund der Gasgesetze — die volumenetrischen.

α) Die geschlossenen, thermometerähnlichen Geräte haben ein größeres Gefäß mit daran anschließender Kapillare, die nach dem Füllen zugeschmolzen wird und eine in ihren Korrekturen bekannte Teilung hat. Die Größe des Gefäßes — etwa bis zum Teilstrich 0 — wird besonders durch Auswägen bestimmt, ebenso der Querschnitt der Kapillare. Zur Vermeidung von Korrekturen ist das Gerät in der gleichen Weise zu benutzen (also z. B. in senkrechter Lage, mit dem gleichen inneren Druck), wie bei der Bestimmung der Gerätekonstanten. Sonst sind bei Präzisionsmessungen entsprechende Korrekturen zu beachten [62]. Ferner soll das Gerät möglichst ganz eintauchend benutzt werden; im anderen Falle muß die durch den herausragenden Faden bedingte Korrektur durch eine Näherungsrechnung gefunden werden, weil dabei die gesuchte Ausdehnung der Flüssigkeit mit eingeht. Es muß zu der Ablesung, wenn  $l$  die in Einheiten der Skale ausgedrückte Länge des Fadens ist, die Größe  $(\gamma_g - \gamma_{fl}) \cdot l \cdot (t - t')$  hinzugefügt werden, wo  $\gamma_g$  für das Glas 16<sup>III</sup> 0,000024 und für Glas 2954 0,000018 ist. Es werden nun unter Berücksichtigung der gemachten Ausführungen Volumina bei den Temperaturen  $t$  und  $t_0$  (als Ausgangstemperatur) bestimmt. Sind diese Volumina  $v$  und  $v_0$ , so besteht die Beziehung — entsprechend wie beim Auftriebsverfahren:

$$(17) \quad \gamma_{fl} \cdot v_0 - \gamma_f \cdot v = \frac{v - v_0}{t - t_0}.$$

$\beta$ ) Für viele Zwecke, insbesondere bei Reihenbeobachtungen, ist es bequemer, wenn die Kapillare des Gerätes geöffnet ist. Dann wird häufig die Kapillare seitlich angebracht und das zur Temperaturmessung benötigte Thermometer mit einem Ansatzschliff in der Mitte aufgesetzt. Man erhält damit das gewöhnlich Pyknometer genannte Gerät [63]. Wiederum müssen durch besondere Messung das Volumen bei der Ausgangstemperatur und der Querschnitt der mit mm-Teilung versehenen Kapillare bestimmt werden. Es gilt dieselbe Gleichung wie beim geschlossenen Gerät. Statt der Ablesung des Flüssigkeitsstandes in der Kapillare an einer mm-Teilung kann — bei leitenden Flüssigkeiten — ein Taster, der zwei isoliert geführte Metalldrähte auf ganzer Länge hat, in die Kapillaren eingelassen werden. Sobald die herausragenden Drahtenden die Flüssigkeit berühren, wird elektrischer Kontakt gegeben und die Einführtiefe des Tasters gemessen [64]. Oder aber es wird ein Platindraht in der Kapillare ausgespannt und der elektrische Widerstand des herausragenden Teiles vor, dann nach der Temperaturänderung, damit also die Standänderung, gemessen [65].

$\gamma$ ) Will man mit dem Pyknometerverfahren die Wärmeausdehnung fester Körper bestimmen, so ist es umständlich und meistens aus technischen, sowie stofflichen Gründen unmöglich, aus ihm ein Pyknometer herzustellen. Es wird dann der zu untersuchende Stoff von beliebiger Gestalt in ein Pyknometer getan, dessen Apparatekonstanten bekannt sind. Das Pyknometer wird mit einer für den Stoff passenden Flüssigkeit gefüllt. Es sei  $\gamma_f$  der bekannte Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit,  $\gamma_g$  der des Pyknometerbaustoffes und  $\gamma_x$  der gesuchte. Ist dann  $V_0$  das von der Flüssigkeit und dem zu untersuchenden Stoff eingenommene Volumen bei der Temperatur  $t_0$ ,  $v_{f t_0}$  das der Flüssigkeit,  $V_{x_0}$  das des zu untersuchenden Stoffes, so besteht die Beziehung

$$(18) \quad \frac{V - V_0}{t - t_0} = \gamma_f \cdot v_{f t_0} + \gamma_x \cdot V_{x_0} - \gamma_f \cdot V,$$

aus der  $\gamma_x$  berechnet werden kann.  $t - t_0$  ist der Temperaturunterschied,  $V$  das am Pyknometer abgelassene Volumen bei  $t^0$  (Verdrängungsverfahren).

$\delta$ ) Das genaue Heraussuchen einer Kapillare kann vermieden werden, wenn der Pyknometerhals eine beliebige Gestalt erhält, z. B. in eine nach unten umbiegende Spitze ausgezogen und noch besonders hergerichtet wird. Die Spitze wird an ihrem Ende ein wenig verdickt

und auf kurzer Strecke zugeschmolzen; alsdann wird das äußerste Ende so lange geschliffen, bis eine feine Öffnung vorhanden ist. Bei der Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten einer Flüssigkeit nun wird das Pyknometer vollständig (bei  $t_0$ ) gefüllt; sie habe die Masse  $m_0$ . Alsdann wird die bei Temperaturerhöhung (bis  $t$ ) ausfließende Flüssigkeitsmenge aufgefangen (oder auch durch Betupfen mit Fließpapier beseitigt), und die verbliebene Masse erneut bestimmt ( $m$ ). Dann ergibt sich wiederum die Beziehung:

$$(19) \quad \gamma_t \cdot m - \gamma_f \cdot m_0 = \frac{m_0 - m}{t - t_0}.$$

Es ist auch möglich, die aufgefangene Flüssigkeitsmenge zu wägen und damit durch Differenzbildung das  $m$  zu messen.

Dieses Verfahren (Wäge-, Überlauf- oder Ausfließverfahren genannt) eignet sich gleichfalls zur Bestimmung der Volumenausdehnung fester Körper. Dann erhält Gleichung (19) ein entsprechendes Glied mit  $\gamma_x$ .

Bei Temperaturniedrigung wird nach Füllen des Pyknometers bei  $t_0$  das Ende der Verlängerung in ein Vorratsgefäß eingetaucht, aus dem dann Flüssigkeit in das Pyknometer einfließt. Bevor die Temperatur wieder erhöht wird, muß das Vorratsgefäß durch ein anderes ersetzt werden, damit die Differenzmenge bestimmt werden kann. Das Verfahren ist wegen der Zusatzeinrichtungen recht umständlich.

Beim offenen Pyknometer sowohl, wie beim Überlaufverfahren ist darauf zu achten, daß sich die Kapillare bzw. ihre Verlängerung auf der erhöhten Temperatur befindet; gegebenenfalls sind beim Temperaturbad entsprechende Aufbauten vorzusehen.

e) Zum Abschluß sollen jene Verfahren besprochen werden, bei denen als Füllstoff Gase verwendet werden. Der Berechnung liegt das Boyle-Mariottesche Gesetz zugrunde. Es wird ein gasgefüllter Raum, der unter Druck  $p$  steht, um ein bekanntes Volumen  $V_z$ , indem man das vorher mit Quecksilber gefüllte Zusatzvolumen freigibt, vergrößert; der nunmehr herrschende Druck sei  $p'$ ; alsdann gilt bei

$$\text{konstanter Temperatur } V \cdot p = (V + V_z) \cdot p' \text{ oder } V = V_z \cdot \frac{p'}{p - p'}.$$

Wird jetzt der zu untersuchende Stoff in den Raum gebracht und die Versuche wiederholt, dann ergibt sich ein

$$(20) \quad V' = V_z \cdot \frac{p''}{p - p''};$$

$V - V'$  ist das gesuchte Volumen des Stoffes. Ist  $V$  als Apparatekonstante in seiner Abhängigkeit von der Temperatur bekannt, so würde grundsätzlich die auf diese Weise gewonnenen  $V'$  in Abhängigkeit von der Temperatur das Wärmeausdehnungsverhalten des eingebrachten Stoffes erfassen (Volumenometer).

ε<sub>1</sub>) Eine praktische Ausführung der Anordnung ist in Abb. 31 wiedergegeben [67], bei der das Zusatzvolumen nach Füllen des Versuchsgefäßes mit demselben Gas, aber unter anderem Druck gefüllt wird. Es ist dabei zu beachten, daß es kaum möglich ist, die ganze

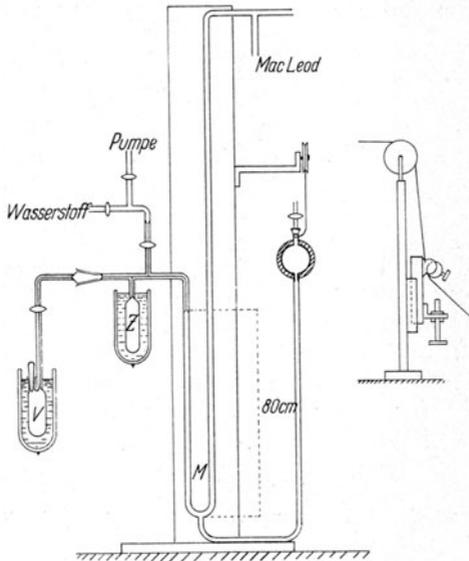


Abb. 31. Volumenometrisches Verfahren:  $V$  Versuchsvolumen,  $Z$  Zusatzvolumen,  $M$  Manometer

Apparatur auf der gleichen Temperatur zu halten. Die Volumina der herausragenden Teile müssen sehr klein gehalten und ihr Einfluß durch Rechnung berücksichtigt werden.

Der Gang der Rechnung läßt sich so darstellen:

$V$  sei das Volumen des Versuchsgefäßes,  $V_x$  das des zu untersuchenden Stoffes,  $V_g$  das des Füllgases, also

$$(21 a) \quad V - V_g = V_x,$$

$V_z$  das Zusatzvolumen,  $V_s$  das des schädlichen Raumes. Die entsprechenden absoluten Temperaturen seien  $T_g$ ,  $T_z$  und  $T_s$ , die Drucke

vor der Vereinigung  $p_g$ ,  $p_z$  und  $p_s$ , danach  $p$ . Alsdann ergibt sich für

$$(21) \quad V_g = V_z \frac{T_g}{T_z} \cdot \frac{p - p_z}{p_g - p} + V_s \frac{T_g}{T_s} \frac{p - p_s}{p_s - p}.$$

Das für zwei verschiedene Temperaturen  $T_{g_2}$  und  $T_{g_1}$  durchgeführt, ergibt unter Berücksichtigung der Gleichung (21 a)  $V_{x_2} - V_{x_1}$  und damit durch Division von  $V_{x_1}$  und der Temperaturdifferenz den Ausdehnungskoeffizienten. Vor allem bei tiefen Temperaturen ist eine Korrektur für die Abweichung des Verhaltens des Gases vom idealen Gasgesetz zu berücksichtigen. Statt der beobachteten Drucke  $p$  sind die verbesserten

$$(22) \quad p_i = p - \beta_T p^2$$

einzusetzen. Die Größe  $\beta_T$  ist für Wasserstoff, Helium und Stickstoff in Tabelle 2 niedergeschrieben.

Tabelle 2

T	$\beta_T \cdot 10^3$		
	H <sub>2</sub>	He	N <sub>2</sub>
293	0,0008	0,0006	- 0,0004
194	0,0009	—	- 0,0035
78	- 0,0022	0,0022	—
20	—	- 0,0023	—

Durch einen besonderen Versuch läßt sich feststellen, ob der betreffende Stoff einen Teil des Füllgases adsorbiert. Es sei bei der Temperatur  $T_1$

$$T_1 \frac{p_1 \cdot V_{g_1}}{T_1} + \frac{p_1 V_z}{T_1}.$$

Wird nun das Versuchsgefäß auf die Temperatur  $T_2$  gebracht, so gilt

$$\frac{p_x \cdot V_{g_2}}{T_2} + \frac{p_x \cdot V_z}{T_1}.$$

Daraus kann man genähert  $p_x$  berechnen, wenn man Näherungswerte für  $V_{g_1}$  und  $V_{g_2}$  einsetzt.

$$(23) \quad p_x = \frac{T_2 p_1 (V_{g_1} + V_z)}{V_{g_2} \cdot T_1 + V_z \cdot T_2}.$$

Der tatsächlich beobachtete Druck darf von dem berechneten nicht wesentlich abweichen: sonst liegt Adsorption vor.

$\varepsilon_2$ ) Etwas einfacher und besonders in der Ausschaltung der Unsicherheiten günstiger werden die Verhältnisse bei der in Abb. 32 wiedergegebenen Apparatur [66]. Dem Versuchsgefäß  $V$  wird ein fast gleiches  $\Omega$  gegenübergestellt. Beide befinden sich auf derselben Temperatur. Außerhalb des Temperaturbades sind die Verbindungsleitungen mit den Volumina  $v$  und  $\omega$ , das Hahnsystem  $L$ ,  $M$ ,  $P$  und  $Q$ , ein Manometer, das Druckdifferenzen zwischen  $V$  und  $\Omega$  anzeigt, sobald  $P$  und  $Q$  geschlossen,  $L$  und  $M$  offen sind. Ferner haben beide Seiten noch je einen Zusatzraum, dessen Volumen durch Verändern des Quecksilberstandes in ihm beliebig zu- oder abgeschaltet werden kann. Der Versuchs-

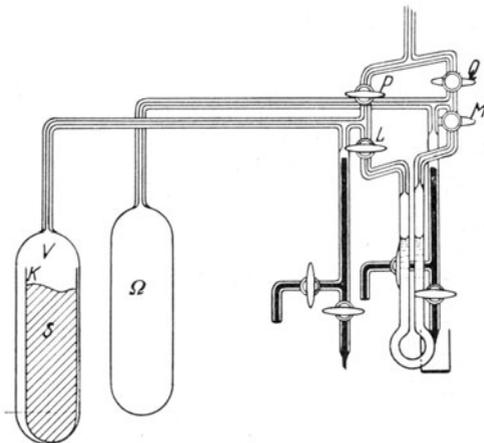


Abb. 32.

Volumenometrisches Differentialverfahren:  $V$  Versuchsraum,  $S$  der zu untersuchende Stoff,  $K$  Füllgefäß für  $S$ ,  $\Omega$  Vergleichsvolumen,  $LMPQ$  Hähne

stoff befindet sich, wenn ein Einfrieren zu befürchten ist, zum Schutze des Versuchgefäßes in einem Behälter  $K$ . Die Volumina  $V$ ,  $\Omega$ ,  $K$ ,  $v$ ,  $\omega$ , einschließlich der Räume über der Manometerflüssigkeit, für die sich eine stark konzentrierte Schwefelsäure sehr eignet, müssen durch vorheriges Auswägen bekannt sein, auch in ihrem Verhalten bei Temperaturänderung. Wird nun zu Beginn des Versuchs ( $V$  und  $\Omega$  auf der Temperatur  $T_0$ ) der Druck auf beiden Seiten gleich groß gemacht ( $p_0$ ), dann muß nach Erreichen der Temperatur  $T$  durch Verändern des Quecksilberstandes in den Zusatzvolumina der Druck wieder gleichgemacht werden; das wird durch das zwischengeschaltete Manometer angezeigt. Dabei sei auf der  $\Omega$ -Seite — etwa durch Auswägen des ausgelaufenen Quecksilbers bestimmt — die Volumenänderung  $\delta$ .

Dann ergibt sich folgende Rechnung:

$$\frac{p_0(V_0 - K_0 - S_0)}{T_0} + \frac{p_0 v_0}{T'_0} = \frac{p(V - K - S)}{T} + \frac{p v}{T'}$$

und

$$\frac{p_0 \Omega_0}{T_0} + \frac{p_0 \omega_0}{T'_0} = \frac{p \cdot \Omega}{T} + \frac{p \omega}{T'} + \frac{p \cdot \delta}{T''}$$

$$\frac{V_0 - K_0 - S_0 + \frac{T_0}{T'_0} \cdot v_0}{\Omega_0 + \frac{T_0}{T'_0} \omega_0} = \frac{V - K - S + \frac{T}{T'} \cdot v}{\Omega + \frac{T}{T'} \omega + \frac{T}{T''} \cdot \delta} = \frac{Z - S}{N} = c.$$

Der Volumenausdehnungskoeffizient des untersuchten Stoffes ist dann gleich

$$(24) \quad \gamma = \frac{S - S_0}{S_0 \Delta T} = \frac{Z - cN - S_0}{S_0 \Delta T}.$$

ζ) Für Temperaturen des flüssigen Heliums ist die in Abb. 33 gezeigte Apparatur verwendbar. Sie ist — ähnlich wie bei der Bestimmung des linearen Ausdehnungskoeffizienten (s. S. 35) — nur mittelbar zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten möglich [69]. Mit der Apparatur werden die Isopyknen des flüssigen Heliums aufgenommen. Das Gefäß  $V$  aus Kupfer — als Piezometer benutzt —, dessen Volumen bei Zimmertemperatur ausgemessen und für die tiefe Temperatur mit dem bekannten Ausdehnungskoeffizienten des Kupfers errechnet ist, wird durch Ventil  $K_1$  und Leitung  $C_1$  mit Helium gefüllt, das Ventil  $K_2$  ist dabei verschlossen. Mit der so eingefüllten Menge wird in Abhängigkeit von der Temperatur der Druck an  $M$  bestimmt; schädliche Volumina (z. B. der Zuleitung  $C_2$ ) müssen berücksichtigt werden. Für eine zweite Kurve wird über  $K_2$  in  $B$  eine meßbare Menge Helium abgenommen (Stand bei  $A$  beachten!) und ein zweiter Meßgang wiederholt.  $S_T$  ist Standanzeiger für die Kühlflüssigkeit,  $F$  Vorratsgefäß. So ergeben sich Kurven gleicher Dichte; also die Drucke als Funktion der Temperatur. Daraus nun erhält man den Volumenausdehnungskoeffizienten des flüssigen Heliums, indem man bei konstantem Druck die Dichtewerte und die zugehörigen Temperaturen abliest und in Gleichung (11) einsetzt.

η) Bei hohen Drucken liegen grundsätzlich die Verhältnisse ebenso wie bereits bei den Verfahren zur Bestimmung des linearen Ausdehnungskoeffizienten erörtert wurde (s. S. 35). Es sind also wieder

Kompressibilitätsmessungen bei verschiedenen Temperaturen durchzuführen und dann bei konstantem Druck die zusammengehörigen Werte des Volumens und der Temperatur aus dem Diagramm abzulesen. Die dazu verwendeten Apparate sind Piezometer in verschiedenen

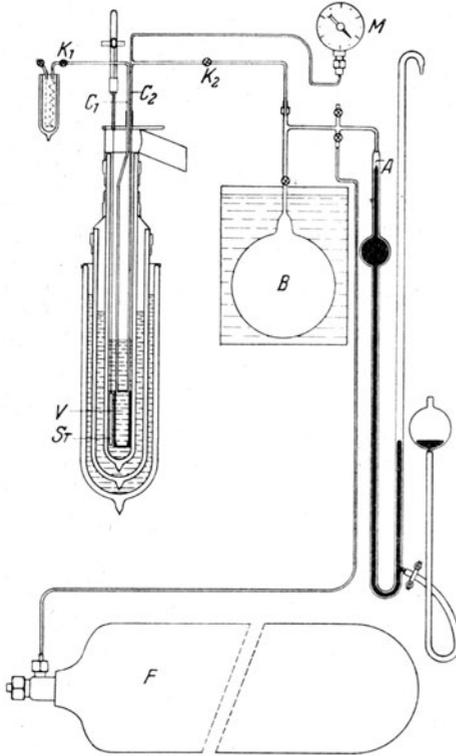


Abb. 33. Einrichtung für sehr tiefe Temperaturen und hohe Drucke.  $V$  Versuchsgefäß aus Kupfer,  $C_1$  und  $C_2$  Zuleitungen,  $K_1$  und  $K_2$  Ventile,  $M$  Manometer,  $B$  Meßvolumen,  $S_T$  Standanzeiger,  $A$  Festpunkt,  $F$  Vorratsgefäß

Ausführungen. Der Baustoff ist dem Druckbereich anzupassen; Glas eignet sich über  $1000 \text{ kg/cm}^2$  nicht mehr. Das gewöhnliche Pyknometer erhält eine gedrungene Gestalt und eine feine kurze Kapillare. Nach Füllung mit der zu untersuchenden Flüssigkeit wird Quecksilber darüber geschichtet. Bei Druckerhöhung dringt dieses in das Pyknometergefäß ein

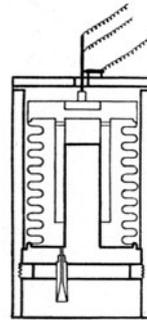


Abb. 34. Verfahren konstanter Menge für hohe Drucke mit kontinuierlicher Ablesung der Volumenänderung

und fällt zu Boden, so daß es bei Druckerniedrigung nicht zurückfließen kann. Durch Bestimmen der eingetretenen Quecksilbermenge (Korrektion durch die Kompressibilität des Quecksilbers berücksichtigen!) wird die unter Druck erfolgte Volumenänderung erfaßt [70]. Kontinuierlich läßt sich die Volumenänderung beobachten, wenn man ein abgeschlossenes Volumen mit dehnbaren Wänden versieht (siehe

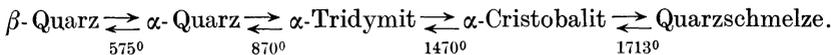
Abb. 34) und die druckbedingte Verschiebung an einem Schleifdraht (s. S. 36) mißt. Die Anordnung wird vorher durch Messen des wirklichen Querschnittes und durch Verschieben um bekannte Strecken bei Atmosphärendruck geeicht [71]. Dann wird nach Füllen und Abschließen bei  $A$  das Ganze unter Druck gebracht, die Isothermen: Volumenänderung in Abhängigkeit vom Druck bestimmt und daraus  $-p = \text{konstanz} - \text{der Volumenausdehnungskoeffizient}$ .

## Schlußteil: Empfehlungen für die Verwendung von Vergleichsstoffen und Tabellen dazu

Die mittelbaren Verfahren setzen die Kenntnis des Wärmeausdehnungsverhaltens eines Stoffes voraus. Dessen besondere Geeignetheit hängt von den besonderen Zwecken der betreffenden Aufgabe ab. Ganz allgemein aber muß man von diesen Vergleichsstoffen verlangen, daß sie selbst möglichst keine zu große Ausdehnung haben, leicht und in stets gleicher Güte erreichbar, sowie bei festen Stoffen leicht bearbeitbar sind. Ferner sollen sich im Ausdehnungsverhalten keine Unstetigkeiten allgemein sowie im besonderen beim Aufwärts- und Abwärtsgang keine Unterschiede zeigen; beim Wiedererreichen der Ausgangstemperatur darf keine bleibende Veränderung vorhanden sein.

### 1. Feste Stoffe

a) Für einen Temperaturbereich von tiefsten Temperaturen bis etwa  $1000^{\circ}$  ist Quarzglas als Vergleichsstoff geeignet; es hat einen kleinen Ausdehnungskoeffizienten, bei Temperaturen oberhalb  $0^{\circ}\text{C}$  keine wesentliche Unregelmäßigkeiten. Zwischen  $500$  und  $600^{\circ}$  macht sich ganz schwach ein Aufspaltpunkt bemerkbar, indem der Ausdehnungskoeffizient bis dahin ansteigt und dann bis  $1056^{\circ}$  (Nähe des Transformationspunktes) abfällt [72]. Es empfiehlt sich, die verschiedenen Umwandlungen der  $\text{SiO}_2$ -Modifikationen zu merken:



Für Quarzglas können die Gleichungen.

$$(25) \quad \left. \right|_{+100^{\circ}}^{-253}: l = l_0 (1 + 3,63 \cdot 10^{-7} \cdot t + 1,813 \cdot 10^{-9} t^2 - 3,40 \cdot 10^{-12} t^3),$$

$$(26) \quad \left. \right|_{t_{00}^{\circ}}^0: l = l_0 (1 + 3,95 \cdot 10^{-7} t + 1,282 \cdot 10^{-9} t^2 - 1,688 t^3)$$

verwendet werden. Daraus sind die Werte der Tabelle 3 berechnet. Unterhalb 0° C — etwa in der Gegend von — 80° C — hat Quarzglas ein Dichtemaximum; von da an dehnt es sich wieder aus und fällt erst

Tabelle 3. Quarzglas  
Ausdehnung zwischen 0 und  $t^0$  in mm/m

$t$	mm/m	$t$	mm/m	$t$	mm/m
— 253	+ 0,078	0	0	600	0,36
— 200	+ 0,027	+ 100	+ 0,051	700	0,40
— 150	— 0,021	200	0,117	800	0,45
— 100	— 0,015	300	0,188	900	0,50
— 50	— 0,013	400	0,254	1000	0,54
		500	0,306		

unterhalb der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs wieder ab [15]. Dieses Dichtemaximum ist bei Quarzgläsern verschiedener Herkunft nicht so einheitlich festlegbar, wie sonst allgemein das andere Verhalten. Indes ist diese Unsicherheit nicht so schwerwiegend, da im Umkehrpunkt die Ausdehnung ohnehin sehr gering und nur schwach veränderlich ist.

b) Für das Glas 16<sup>III</sup> (Jena) sind besondere Bemerkungen nicht notwendig; ähnlich wie alle thermometrischen Gläser wird es gleichmäßig hergestellt und hat keine Besonderheiten. Seine Ausdehnungswerte finden sich berechnet nach der Gleichung (27) in Tabelle 4 [25].

$$(27) \quad {}_{-253}^{+100}l = l_0 \left[ 1 + \left\{ 52,6 \left( \frac{t}{100} \right) + 45,1 \left( \frac{t}{100} \right)^2 - 0,1 \left( \frac{t}{100} \right)^3 + 9,5 \cdot \left( \frac{t}{100} \right)^4 \right\} \cdot 10^{-6} \right].$$

Tabelle 4. Glas 16<sup>III</sup>  
Ausdehnung zwischen 0 und  $t^0$  in mm/m

$t^0$	mm/m	$t^0$	mm/m
— 253	— 1,22	0	0,00
— 200	— 1,15	100	0,81
— 150	— 0,97	200	1,67
— 100	— 0,68	300	2,60
— 50	— 0,35	400	3,60
0	0,00	500	4,65

c) Für Temperaturen bis 1700° eignet sich Sinterkorund; es erfüllt nicht die Bedingung der kleinen Wärmeausdehnung, verhält sich aber sonst regelmäßig. Die Werte sind in Tabelle 5 aufgeführt [28].

Tabelle 5. Sinterkorund  
Ausdehnung zwischen 0 und  $t^\circ$  in mm/m

$t$	mm/m	$t$	mm/m	$t$	mm/m
0	0,00	600	4,45	1200	10,15
100	0,60	700	5,30	1300	11,15
200	1,30	800	6,20	1400	12,15
300	2,00	900	7,15	1500	13,15
400	2,75	1000	8,15	1600	14,15
500	3,60	1100	9,15	1700	15,15

## 2. Flüssigkeiten

Am besten bekannt in ihren Verhalten sind:

a) Wasser, das außer dem Dichtemaximum bei 4° C keine Besonderheiten aufweist [s. Tabelle 6<sup>1)</sup>] und

b) Quecksilber, von dem sich die notwendigen Angaben in Tabelle 7<sup>1)</sup> befinden.

Tabelle 6. Wasser

$t$ Grad	Volumen von 1 g Wasser in cm <sup>3</sup> bei 1 Atm.	Zunahme je 1° 10 <sup>5</sup>	$t$ Grad	Volumen von 1 g Wasser in cm <sup>3</sup> bei 1 Atm.	Zunahme je 1° 10 <sup>5</sup>
0	1,000 16		50	1,012 10	
4	1,000 03		55	1,014 51	48
10	1,000 30		60	1,017 08	51
15	1,000 90	12	65	1,019 82	55
20	1,001 80	18	70	1,022 73	58
25	1,002 97	23	75	1,025 79	61
30	1,004 38	28	80	1,029 02	65
35	1,006 01	33	85	1,032 40	68
40	1,007 85	37	90	1,035 93	71
45	1,009 88	41	95	1,039 62	74
50	1,012 10	44	99	1,042 68	76
			100	1,043 46	78

<sup>1)</sup> Vgl. Wärmetabellen der Phys. Techn. Reichsanstalt, S. 48ff.

Spezifisches Gewicht ( $s$ )

$$(28a) \quad 1 - s = \frac{(t - 3,98)^2}{503\,570} \cdot \frac{t + 288}{t + 67,26} \quad \text{zwischen } 0 \text{ und } 40^\circ \text{C.}$$

$$(28b) \quad 1 - s = \frac{(t - 3,982)^2}{466\,700} \cdot \frac{t + 273}{t + 67} \cdot \frac{350 - t}{365 - t}$$

Maximaldichte bei 1 Atm.:

$$0,999\,973 \text{ g/cm}^3.$$

Tabelle 7. Quecksilber

Die Ausdehnung der Volumeneinheit ( $a$ ) zwischen

$$(29a) \quad 0/100^\circ: \left\{ 18,182 \cdot \frac{t}{100} + 0,078 \cdot \left( \frac{t}{100} \right)^2 \right\} \cdot 10^{-3}.$$

$$(29b) \quad 100/300^\circ: \left\{ 18,181 \cdot \frac{t}{100} + 0,0347 \cdot \left( \frac{t}{100} \right)^3 - 0,000\,20 \left( \frac{t}{100} \right)^4 \right\} \cdot 10^{-3},$$

beide gültig für Atmosphärendruck.

200/500<sup>0</sup> ( $p$  in Atm.)

$$(29c) \quad \left\{ 18,223 \cdot \frac{t}{100} + 0,0131 \left( \frac{t}{100} \right)^2 + 0,0399 \left( \frac{t}{100} \right)^3 + 0,000\,93 \left( \frac{t}{100} \right)^4 \right\} \cdot 10^{-3}.$$

$$\left\{ 1 - 4,7 \cdot 10^{-7} \frac{t}{100} (p - 1) \right\} - 4,7 \cdot 10^{-9} (p - 1).$$

Für  $p = 1$  Atm.

$t_0$	$a$	$t_0$	$a$	$t_0$	$a$
0	0,000 000	30	0,005 462	90	0,016 427
5	0,000 909	40	0,007 285	100	0,018 260
10	0,001 819	50	0,009 111	150	0,027 48
15	0,002 729	60	0,010 937	200	0,036 81
20	0,003 640	70	0,012 766	250	0,046 28
25	0,004 550	80	0,014 596	300	0,055 90

Für  $p = 20$  Atm.

$t_0$	$a$
250	0,046 28
300	0,055 91
350	0,065 76
400	0,075 85
450	0,086 24
500	0,096 96

c) Bei den geschmolzenen Salzen sind einige Vorbehalte zu machen und Hinweise zu geben. Es ist offensichtlich schwer, die Stoffe so einheitlich zu erhalten, daß die mitgeteilten Werte ohne Einschränkung gegeben werden dürfen. Darüber hinaus wurde beim Vergleich der von verschiedenen Autoren veröffentlichten Werte gefunden, daß sie sehr stark schwanken. Es ist versucht worden, die Schwankungen so auszugleichen, daß die zweiten Stellen noch sicher sind. Dadurch ergibt sich aber auch, daß der Ausdehnungskoeffizient nicht sehr genau erfaßbar ist; es kann gesagt werden, daß das  $a$  der Tabelle 8 zwischen  $50$  und  $60 \cdot 10^{-5}$  liegt. Es empfiehlt sich bei Anspruch auf hoher Genauigkeit, wenigstens einen Wert der Dichte zu bestimmen und dann in Differenz gegen die Werte aus der Tabelle 8 aufzurechnen. Oder aber man nimmt zwei Temperaturpunkte zur Nachprüfung; die Linearität der angegebenen Gleichung ist bei den genannten Stoffen und vielen ähnlichen gesichert. Meist wird aber die Tabelle 8 ausreichen.

Tabelle 8. Geschmolzene Salze

(30)

$$s_t = s_{t'} - a(t - t').$$

Salz	$t'$	$s_{t'}$	$a \cdot 10^5$	Bereich
K Cl . . . . .	768	1,528	57	768/950 <sup>0</sup>
Na Cl . . . . .	900	1,486	63	800/1000 <sup>0</sup>
Na Cl + K Cl . . . . .	700	1,572	55	700/1100 <sup>0</sup>
Li Cl + K Cl . . . . .	400	1,660	51	400/800 <sup>0</sup>

### Schrifttum

- [1] E. Grüneisen, Handb. d. Phys. (Geiger-Scheel) **10**, 1, 1926.  
 [2] J. Gieleßen, Glas und Apparat **19**, 181, 195, 205, 1938.  
 [3] O. Knoblauch u. K. Hencky, Anleitung zur genauen technischen Temperaturmessung, München-Berlin 1926.  
 [4] A. Boutillier, C. R. **203**, 512, 1936.  
 [5] H. Ebert u. C. Tingwaldt, Phys. Z. **37**, 471, 1936; E. Lux, Ber. d. Deutsch. ker. Ges. **13**, 542, 1932; W. M. Cohn, Veröff. KWI-Silikatforschung **4**, 1930.  
 [6] K. Scheel u. W. Heuse, Verh. d. Deutsch. phys. Ges. **9**, 449, 1907.  
 [7] F. P. G. A. J. van Agt u. K. Kamerlingh Onnes, Comm. Leiden 176 a 19, weiterer Ausbau der Apparatur: W. H. Keesom u. A. T. J. Jansen, ebenda 182a, 1926; Keesom u. A. Bijl, ebenda 203a, 1929.  
 [8] H. Gerdien u. W. Jubitz, Wiss. Veröff. Siemens-Konz. **4**, 59, 1925; **8**, 218, 1929/30, Z-Heft.  
 [9] A. G. Worthing, Phys. Rev. **10**, 638, 1917.

- [10] L. Fizeau, *Ann. chem. et phys.* **2**, 143, 1864; **8**, 335, 1866.
- [11] C. Pulfrich, *Z. f. Instrkde.* **13**, 365, 1893; H. Lehmann u. M. Th. Schulze, *Zeiß-Nachr.* Heft 10, 1936: Kösterssche Lichtwellenschieber; Abhängigkeit der Wellenlängen von Temperatur, Druck und Feuchtigkeit: W. Traub, *Ann. Phys.* **61**, 533, 1920; E. Stoll, ebenda **69**, 81, 1922; A. Zwetsch, *Z. f. Phys.* **19**, 398, 1923; M. Opladen, ebenda **42**, 160, 1927.
- [12] K. Scheel, *Ann. Phys.* **9**, 837, 1902.
- [13] K. Scheel, *Verh. d. Deutsch. phys. Ges.* **9**, 3, 718, 1907.
- [14] K. Scheel u. W. Heuse, *Verh. d. Deutsch. phys. Ges.* **14**, 1, 1914.
- [15] H. Adenstedt, *Ann. Phys.* (5) **26**, 69, 1936; weitere Arbeiten: W. H. Keesom u. D. W. Doborsyński, *Comm. Leiden* **234b**, 1933/34; C. E. Meritt, *Bur. of Stand. J. Res.* **10**, 59, 1933 (Theorie); S. Valentiner u. J. Wallot, *Ann. Phys.* **46**, 837, 1915; s. auch J. B. Austin, *Physics* **3**, 240, 1932 (Vakuum), J. S. Saunders, *Bur. of Stand. J. Res.* **23**, 179, 1939 (Hinweis auf 2 vermeidbare Fehler: Das Verziehen des Zwischenringes bei Vorhandensein von mechanischen Spannungen und die Änderung der Gashautdicke an den Aufliegepunkten). F. C. Nix, *Phys. Rev.* (2) **55**, 606, 1939; die untere Platte dient zugleich als Refraktionsthermometer.
- [16] A. Arnulf, *Rev. d'Opt.* **3**, 270, 1924; R. H. Sinden, *J. Opt. Soc. Am.* **15**, 171, 1927; optische Einrichtung bei A. Trowbridge, ebenda **6**, 145, 1922; **9**, 557, 1924.
- [17] K. Becker, *Z. Phys.* **40**, 37, 1927; **51**, 481, 1928.
- [18] H. Saini, *Helv. Phys. Acta* **6**, 597, 1933.
- [19] J. D. Hanawalt u. L. K. Frevel, *Z. Krst.* **98**, 84, 1937.
- [20] G. F. Kossolapow u. A. K. Trapesnikow, *Z. Krst.* **91**, 410, 1935.
- [21] R. B. Jacobs u. A. Goetz, *Phys. Rev.* (2) **51**, 159, 1937.
- [22] J. W. Buchta u. A. Goetz, *Phys. Rev.* (2) **46**, 1092, 1934; F. Zwicky, *Proc. Nat. Acad. Scient.* **15**, 253 u. 816, 1929; A. H. Jay, *Proc. Roy. Soc. London (A)* **142**, 237, 1933; *Z. Krst.* **89**, 282, 1934.
- [23] M. Widemann, *Bd. VI d. Ergebn. d. techn. Röntgenkde.* Leipzig, Eppert u. Schiehold, 1938; s. auch P. W. Glamann, K. Herrmann u. A. H. Krummacher, *Z. Krst.* **74**, 73, 1930; A. D. Megaw, *Proc. Roy. Soc. London (A)* **142**, 198, 1933; W. Bussem, *Ber. D. Res. Ges.* **16**, 381, 1935; E. A. Owen u. E. L. Yates, *Phil. Mag.* (7) **17**, 113, 1934; **15**, 472, 1932; **16**, 606, 1933 (Hochtemperaturkamera); A. H. Sully, *Proc. Phys. Soc.* **49**, 323, 1937; I. G. Edmunds, *J. I. Metals* **62**, 163, 1938; A. R. Troiano, ebenda **63**, 343, 1938.
- [24] F. Henning, *Ann. Phys.* **22**, 631, 1907.
- [25] H. Ebert, *Z. Phys.* **47**, 712, 1928.
- [26] P. Hildnert u. W. T. Sweeney, *B. of Stand. J. Res.* **1**, 771, 1928; H. Ebert, *Glastechn. Ber.* **13**, 75, 1935; R. C. Gale, *J. sci. instr.* **17**, 131, 1930; P. G. Strelkow, *Phys. Z. Sowjetunion* **12**, 23, 1937.
- [27] E. Barr, *Werkstattstechn.* **32**, 287, 1938; A. H. Stang u. L. R. Sweetman, *B. Stand. J. of Res.* **15**, 199, 1935.
- [28] H. Ebert, *Phys. Z.* **39**, 6, 1938; ebenfalls horizontale Lage des Versuchsstabes bei W. Steger, *Ber. d. D. Ker. Ges.* **13**, 412, 1932.

- [29] P. Chevenard, *Rev. Mét.* **14**, 610, 1917; *Analyse Dilatometrique des Matériaux 1929*, Paris, Dunod; *J. phys. et le Radium* (6) **7**, 240, 1926; (7) **2**, 166 S., 1931; (7) **3**, 84 S., 1932; L. Dunoyer, C. R. **198**, 909, 1934; H. Esser u. P. Oberhoffer, *Stahl u. Eisen* **46**, 142, 1926.
- [30] F. Bollenrath, *Z. Metallkde.* **25**, 163, 1933.
- [31] A. Metz, *Glastechn. Ber.* **16**, 19, 1938.
- [32] A. Werner, *Z. Dampfessel u. Maschinenbetrieb* **36**, Nr. 9, 1913; A. Krupkowski u. W. J. de Haas, *Proc. Amsterdam (Anordnung von W. Broniewski)* **32**, 921, 1929.
- [33] H. G. Jones, *J. Sci. instr.* **11**, 325, 1934; A. Goetz, J. W. Buchta u. T. L. Ho, *R. Sci. Instr. (NS.)* **5**, 428, 1934.
- [34] O. Koerner u. H. Salmang, *Z. anorg. Chem.* **199**, 235, 1931.
- [35] Cl. Williams, *Phys. Rev. (2)* **46**, 1011, 1934; I. Vigness, *Phys. Rev. (2)* **48**, 198, 1935.
- [36] G. Borelins u. C. H. Johannson, *Ann. Phys.* **75**, 23, 1924.
- [37] H. Lange, *Mitt. KWI.-Eisenforschung* **20**, 61, 1938.
- [38] F. Rosenbohm, *Physica* **5**, 385, 1938.
- [39] F. Wever u. A. Rose, *Mitt. KWI.-Eisenforschung* **20**, 55, 1938.
- [40] A. Eucken u. W. Dannöhl, *Z. Elektrochem.* **40**, 814, 1934.
- [41] A. Heinz u. H. Kottas, *Sprechsaal* **68**, 49, 65, 1935.
- [42] L. Pungs u. G. Preuner, *Phys. Z.* **20**, 543, 1919; J. Herweg, *Z. Phys.* **3**, 36, 1920; R. Whiddington, *Phil. Mag. (6)* **40**, 634, 1920; A. Schulze, *Z. Phys.* **50**, 448, 1928; S. Reisch, *Z. Hochfrequ.* **38**, 101, 1931; W. E. Prytherch, *J. sc. Inst.* **9**, 129, 1932.
- [43] J. C. Hubbard, *Science* **83**, 472, 1936.
- [44] H. Sieglerschmidt, *Z. Instrkde.* **45**, 374, 1925.
- [45] A. Klemm u. E. Berger, *Glastechn. Ber.* **5**, 405, 1927/28.
- [46] J. G. Priest, *B. of Stand. Sc. Paper* **15**, 669, 1920.
- [47] J. K. Roberts, *N. Phys. Lab. Coll. Res.* **19**, 75, 1926.
- [48] H. Reich, *Ber. d. D. Ker. Ges.* **13**, 157, 1932.
- [49] U. Retzow, *Stahl u. Eisen* **41**, 1783, 1921.
- [50] P. Selényi u. E. Patai, *Z. Instrkde.* **46**, 246, 1926.
- [51] B. W. Rabinowitsch, *Betriebs-Lab. (russ.)* **5**, 624, 1936: dort wird das Verfahren auf Frommel zurückgeführt.
- [52] Th. C. Poulter, *Phys. Rev. (2)* **35**, 297, 1930.
- [53] P. W. Bridgman, *Proc. Amer. Acad.* **47**, 321, 1911.
- [54] P. W. Bridgman, *Proc. Amer. Acad.* **85**, 165, 1923.
- [55] M. Thiesen, K. Scheel u. H. Disselhorst, *Wiss. Abh. d. Phys. Techn. Reichsanstalt* **3**, 1, 1900; H. E. Callendar u. H. Moss, *Phil. Trans. (A)* **211**, 1, 1911; P. Chappuis, *Trad. et Mim. du Bur. int. XVI*, 1912 (beide untersuchten Quecksilber, wie zuerst Regnault); s. auch L. Holborn, *Hdb. Exp. Phys.* **1**, 159, 1926; dort auch kurze Hinweise für die anderen Verfahren. C. Benedicks, W. Ericsson u. G. Ericson, *Arch. Eisenhüttenw.* **3**, 473, 1930, u. *Stahl u. Eisen* **50**, 332, 1930: Vergleich einer Säule aus flüssigem Eisen mit einer von Quecksilber.
- [56] R. v. Dallwitz-Wegner, *Meßtechn.* **3**, 5, 1927.
- [57] K. Bornemann u. F. Sauerwald, *Z. Metallkde.* **14**, 145, 1922; W. Hänlein, *Glastechn. Ber.* **10**, 126, 1932; G. Heidtkamp u. K. Endell, ebenda **14**, 89, 1936; A. Lambertz, *Chem. Ztg.* **60**, 755, 1936.

- [58] H. Grothe u. K. Mangelsdorff, Z. Metallkde. **29**, 352, 1937.
- [59] J. Matuyama, Sc. Rep. Tohoku Univ. **17**, 1, 1928.
- [60] E. S. Gilfillan u. M. Polanyi, Z. phys. Chem. **166**, 254, 1933; E. Hofer, ebenda (B) **27**, 467, 1934; H. Moser, Phys. Z. **35**, 682, 1934.
- [61] K. Bennewitz u. J. J. Windisch, Z. phys. Chem. (A) **166**, 401, 1933.
- [62] K. Scheel, Dissertation Berlin 1890.
- [63] H. Schlüter, Chem. Ztg. **66**, 717, 1936; E. Cohen u. W. J. D. van Dobbenburgh, Z. phys. Chem. (A) **137**, 289, 1928; W. Heuse, ebenda (A) **147**, 282, 1930; W. Biltz, Z. anorg. Chem. **121**, 260, 1922; L. G. Carpenter u. F. H. Dakley, Phil. Mag. (7) **12**, 511, 1931.
- [64] K. Bornemann, P. Siebe u. M. Wehle, Z. Metallkde. **14**, 329, 1922; M. P. Wolarowitsch, Acta physicochim. URSS. **2**, 695, 1935.
- [65] E. Cohen u. A. K. W. A. van Lieshout, Proc. Amstr. **39**, 596, 1936.
- [66] M. Thiesen, K. Scheel u. K. Sell, Wiss. Abhdl. d. Phys. Techn. Reichsanstalt **2**, 75, 1895; R. E. Gibson u. J. F. Kincaid, J. Am. Chem. Soc. **59**, 25, 1937; W. Biltz u. E. Keunecke, Z. anorg. Chem. **147**, 186, 1925; dort ein Überlauf-Pyknometer nach Birk; M. E. Spaght u. G. S. Parks, J. Phys. Chem. **38**, 103, 1934; Überlauf-Pyknometer aus Stahl; G. Jones u. Fr. C. Jelen, J. Amer. Chem. Soc. **57**, 2532, 1935, Verdrängungsverfahren in Anlehnung an T. W. Richards, 1909.
- [67] G. S. Parks u. H. M. Huffman, J. Phys. Chem. **31**, 1842, 1927; Fr. A. Henglein, Z. phys. Chem. **115**, 91, 1925; W. Heuse, ebenda (A) **147**, 266, 1930; W. Biltz, El. Wünnenberg, W. Fischer u. A. Sapper, ebenda (A) **151**, 1, 1930.
- [68] C. J. Smith, Proc. Roy. Soc. (A) **115**, 554, 1927, Gaskorrekturen: L. Holborn u. J. Otto, Z. Phys. **38**, 359, 1926.
- [69] W. H. Keesom u. A. P. Keesom, Comm. Leiden 224d, 1933.
- [70] P. W. Bridgman, Hdb. Exp. Phys. **82**, 243, 1929.
- [71] P. W. Bridgman, Proc. Am. Acad. **66**, 185, 1931.
- [72] W. M. Cohn, Ann. Phys. (5) **4**, 493, 1930; W. Souder u. P. Hidnert, Sc. Pap. Bur. of Stand. Nr. 524, 1926; H. Ebert, Z. Phys. **47**, 712, 1928.

# Namenverzeichnis

Die Kursiv gedruckten Zahlen bedeuten die Nummer des Schrifttumsnachweises,  
die anderen Seitenzahlen

- Adenstedt *15*.  
Agt, van 7.  
Arnulf *16*.  
Austin *16*.
- Barr *27*.  
Becker *17*.  
Benedicks *55*.  
Bennewitz *61*.  
Berger *45*.  
Bijl 7.  
Biltz *63, 66, 67*.  
Birk *66*.  
Bollenrath *30*.  
Borelius *36*.  
Bornemann *57*.  
Boutillier 4.  
Boyle-Mariotte *46*.  
Bragg *16*.  
Bridgman *53, 54, 70, 71*.  
Broniewski *32*.  
Buchta *22, 33*.  
Bussem *23*.
- Callendar *55*.  
Carpenter *63*.  
Chappuis *55*.  
Chevenard *29*.  
Cohen *63, 65*.  
Cohn 5, *72*.
- Dakley *63*.  
Dallwitz-Wegner, von *56*.  
Dannöhl *40*.  
Debye-Scherrer 15.  
Disselhorst *55*.  
Dobbenburgh, van *63*.  
Doborsyński *15*.  
Dulong-Petit *38*.  
Dunoyer *29*.
- Ebert 5, *25, 26, 28*.  
Edmunds *23*.  
Eggert *23*.  
Endell *57*.  
Ericson *55*.  
Ericsson *55*.  
Esser *29*.  
Eucken *40*.
- Fischer *67*.  
Fizeau *10*.  
Frevel *19*.  
Frommel *51*.
- Gale *26*.  
Gerdien 8.  
Gibson *66*.  
Gieleßen 2.  
Gilfillan *60*.  
Glamann *23*.  
Goetz *21, 22, 33*.  
Grothe *58*.  
Grüneisen *1*.
- Haas, de *32*.  
Hänlein *57*.  
Haidinger 8.  
Hanawalt *19*.  
Heidtkamp *57*.  
Heinz *41*.  
Hencky 3.  
Henglein *67*.  
Henning *24*.  
Herrmann *23*.  
Herweg *42*.  
Heuse 6, *14, 63*.  
Hidnert *26, 72*.  
Ho *33*.  
Hofer *60*.  
Holborn *55, 68*.

Hubbard 43.  
Huffmann 67.

Jacobs 21.  
Jansen 7.  
Jay, 22.  
Jelen 66.  
Johannson 36.  
Jones 33, 66.  
Jubitz 8.

Keesom 7, 15, 69.  
Keunecke 66.  
Kincaid 66.  
Klemm 45.  
Knoblauch 3.  
König 26.  
Koerner 34.  
Küstners 11.  
Kossolapow 20.  
Kottas 41.  
Krummacher 23.  
Krupkowski 32.

Lambertz 57.  
Lange 37.  
Lehmann 11.  
Lieshout 65.  
Lux 5.

Mangelsdorff 58.  
Matuyama 59.  
Megaw 23.  
Merrit 15.  
Metz 31.  
Moll 28.  
Moser 60.  
Moss 55.

Nernst 5.  
Newton 14.  
Nix 15.

Oberhoffer 29.  
Onnes 7.  
Opladen 10.  
Otto 68.  
Owen 23.

Parks 66, 67.  
Patai 50.  
Polanyi 60.  
Poulter 52.  
Preuner 42.  
Priest 46.  
Prytherch 42.  
Pulfrich 11.  
Pungs 42.

Rabinowitsch 51.  
Regnault 55.  
Reich 48.  
Reisch 42.  
Retzow 49.  
Richards 66.  
Roberts 47.  
Rose 39.  
Rosenbohm 38.

Saini 18.  
Salmang 34.  
Sapper 67.  
Sauerwald 57.  
Saunders 15.  
Scheel 6, 12, 13, 14, 55, 62, 66.  
Schiebold 23.  
Schlüter 63.  
Schott 35.  
Schulze 11, 42.  
Seeman-Böhlhlin 16.  
Selényi 50.  
Sell 66.  
Siebe 64.  
Siegler Schmidt 44.  
Sinden 16.  
Smith 68.  
Souder 72.  
Spaght 66.  
Stang 27.  
Steger 28.  
Stoll 10.  
Strelkow 26.  
Sully 23.  
Sweeney 26.  
Sweetman 27.

Thiesen 55, 66.  
Tingwaldt 5.

Trapesnikow 20.  
Traub 10.  
Trojano 23.  
Trowbridge 16.

Valentiner 15.  
Vigness 35.

Wallot 15.  
Wehle 64.  
Weidert 25.  
Werner 32.

Wever 39.  
Whiddington 42.  
Widemann 23.  
Williams 35.  
Windisch 61.  
Wolarowitsch 64.  
Worthing 9.  
Wünnenberg 67.  
Yates 23.  
Zwetsch 10.  
Zwicky 22.

## Sachverzeichnis

- Abtastverfahren 7/8.  
Ausdehnungskoeffizient, kubisch,  
  linear 1/2.  
Ausfließverfahren 46.  
Autokollimationsablesefernrohr 25.
- Begriffsfestlegung, kubische, lineare  
  Ausdehnung 1/2.  
Bergkristall 9.  
Bistreifenverfahren 35.
- Doppelspiegelverfahren 26.  
Drähte, Verfahren für Drähte 8, 15,  
  34/35.  
Dreifußverfahren 33.
- Eintauchkörper 42.  
Elektrische Verfahren 29.  
Elementarbereiche 14.  
Entlastungsvorrichtung beim Rohr-  
  verfahren 20/21.
- Fernanzeige 3.
- Glas 16<sup>III</sup> 44, 53.  
  — 2954 44.  
Gleitwinkel 15.
- Hauptausdehnungskoeffizient 37.  
Helium 11, 48.  
Hochtemperaturkammer 16.  
Hohe Drucke 35/36, 50/52.  
Hydrostatische Verfahren 40/44.
- Interferenzverfahren, mittelbar 31  
  bis 33.  
  —, unmittelbar 8/14.
- Interpolationsgleichungen 2.  
Isopyknen 50.
- Kadmium 11.  
Kapazitive Verfahren 30/31.  
Kommunizierende Röhren 38/40.  
Komparator 4/8.  
Kompressibilität 35/36.  
Krypton 11.  
Kubische Ausdehnung 36ff.
- Lichtstrahlverfahren 33.
- Meßkondensator 30.  
Meßuhr 20/21.
- Öl 39.
- Okularmikrometer 4.
- Photozelle 27.  
Piezogesteuerter Kreis 31.  
Pyknometer, geschlossen 44.  
  —, offen 45.  
  —, Überlauf 45/46.
- Quarzglas 9, 19, 52/53.  
Quecksilber 55.
- Registriervorrichtung, mechanisch,  
  optisch, elektrisch 2/3.  
Röntgenstrahlverfahren 14/18.  
Rohrverfahren 18ff.  
  — mit Hebelübertragung 26.  
Rückstrahlverfahren 16/17.
- Schwebekörper 43.  
Sinterkorund 22, 54.

Taster 18ff.	Volumenausdehnung 26ff.
Temperaturbäder 3.	Volumenometer 46ff.
Thermische Achsen 37.	Waagebalkenverfahren 33/34.
Thermometer 3.	Wägeverfahren 46.
Thermometrische Verfahren 44.	Wasser 54/55.
Thermostaten 3.	Wellenlänge einiger Spektrallinien
Thermowaage 42.	11.
Vakuum 26, 28.	Zustandsgleichung 1.
Vakuumphotozelle 28.	

## Bildquellenangabe

- Abb. 2. Phys. Z. **37**, 472, 1936. S. Hirzel, Leipzig.
- Abb. 6. Handb. d. Phys. X, S. 56, Abb. 8. Julius Springer, Berlin.
- Abb. 7. Verhandl. d. D. Phys. Ges. **9**, 1907. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- Abb. 8, 8a, 9. Ann. d. Phys. (5) **26**, 72, 73, 1936. Joh. Ambr. Barth, Leipzig.
- Abb. 10. Z. f. Phys. **40**, 37, 1927 oder **51**, 481, 1928. Julius Springer, Berlin.
- Abb. 12. Z. f. Kristallogr. **98**, 85, 1937. Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H., Leipzig.
- Abb. 15. Phys. Z. **39**, 8, 1938. S. Hirzel, Leipzig.
- Abb. 17. Mitt. a. d. Silikat-Hüttenlab. (Chem.-Techn.) Techn. Hochschule Karlsruhe 1929. Verlag d. Sprechsaal, Müller u. Schmidt, Coburg.
- Abb. 19, 20, 21. Mitt. KWI-Eisenforschung, Düsseldorf, **20**, 56, 61, 62, 1938.
- Abb. 23. Sprechsaal **68**, 50, 1935 (wie Abb. 17).
- Abb. 24. Handb. d. Phys. X, S. 59. Julius Springer, Berlin.
- Abb. 27. Kohlrausch, 17. Aufl., 1935, S. 103. B. G. Teubner, Leipzig.
- Abb. 30. Glastechn. Ber. **10**, 127, 1932. Dt. Glastechnische Gesellschaft, Frankfurt a. M.
- Abb. 32. Proc. Roy. Soc. London **65**, 560, 1927. Harrison u. sons, St. Martin's Lane.
- Abb. 33. Comm. Leiden 224d/1933.
- Abb. 34. Wie Abb. 27, S. 107.