

<b>Dichte- und Gehaltsmessgeräte</b>	<b>PTB-A 13.6</b>
<b>Flüssigkeits-Dichtemessgeräte nach dem Schwingerprinzip</b>	<b>Juni 1994</b>

Die PTB-Anforderungen (PTB-A) an Flüssigkeits-Dichtemessgeräte nach dem Schwingerprinzip für die Zulassung zur innerstaatlichen Eichung entsprechen den anerkannten Regeln der Technik. Diese Anforderungen wurden von der Vollversammlung für das Eichwesen 1993 verabschiedet.

Die Zulassung wird von der PTB erteilt, wenn die Bauart des Flüssigkeits-Dichtemessgerätes nach dem Schwingerprinzip der Eichordnung (EO) sowie den nachstehenden Anforderungen entspricht.

Die Bauart eines Flüssigkeits-Dichtemessgerätes nach dem Schwingerprinzip, die von diesen Anforderungen abweicht, wird zugelassen, wenn die Messsicherheit auf andere Weise gewährleistet ist. In diesem Fall werden die Anforderungen an die Bauart bei der Zulassung festgelegt (§ 16 Abs. 2 der EO).

## Inhaltsübersicht

- 1 Begriffsbestimmungen
- 2 Bauanforderungen und Fehlergrenzen
  - 2.1 Funktionseinheiten
  - 2.2 Temperaturmesseinrichtung
  - 2.3 Anzeigeeinrichtungen
  - 2.4 Zusatzeinrichtungen, Datenübertragung
  - 2.5 Störfestigkeit
  - 2.6 Fehlergrenzen
- 3 Gebrauchsanweisung, Aufschriften
  - 3.1 Gebrauchsanweisung
  - 3.2 Aufschriften
- 4 Zulassung
- 5 Eichung und Wartung
  - 5.1 Wartung
  - 5.2 Vorprüfung
  - 5.3 Eichung
  - 5.4 Stempelung
- 6 Prüfflüssigkeiten

Anlage 1 Die Dichte von reinem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur (ITS 90)

Anlage 2 Die isotherme Kompressibilität von reinem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur (ITS 90)

## 1 Begriffsbestimmungen

Flüssigkeits-Dichtemessgeräte nach dem Schwingerprinzip, nachfolgend Dichtemessgeräte genannt, dienen der Messung der Dichte von Flüssigkeiten im Dichtebereich von  $450 \text{ kg/m}^3$  bis  $2000 \text{ kg/m}^3$ .

Die Dichtemessgeräte können für den Einsatz als Prozessmessgeräte zur Einbindung in verfahrenstechnische Prozesse oder als Labormessgeräte vorgesehen sein.

Die Dichtemessgeräte können zur alleinigen Dichtemessung oder als Bestandteil von Messanlagen zur Bereitstellung der Dichtemesswerte für die Bestimmung weiterer Messgrößen vorgesehen sein.

Eine schwingungsfähige Anordnung, die mit der zu messenden Flüssigkeit gefüllt oder von ihr umgeben ist, wird zur Schwingung angeregt. Die Periodendauer oder Frequenz dieser Schwingung hängt von der Dichte der Flüssigkeit ab.

Die Dichte der Flüssigkeit wird auf der Grundlage von Gerätekonstanten aus der Periodendauer oder Frequenz berechnet.

## 2 Bauanforderungen und Fehlergrenzen

### 2.1 Funktionseinheiten

Das Dichtemessgerät muss mindestens über folgende Funktionseinheiten verfügen:

- die schwingungsfähige Anordnung, die mit der Flüssigkeit gefüllt wird oder von ihr umgeben ist.
- die Einrichtungen zur Anregung und Steuerung der Schwingung.
- die Einrichtungen zur Messung und Anzeige der Periodendauer oder Frequenz sowie der Dichte.
- Einrichtungen zur Messung und Anzeige der Flüssigkeitstemperatur, die für die gemessene Flüssigkeitsdichte gilt.

Die Einrichtung zur Messung der Flüssigkeitstemperatur kann Bestandteil des Dichtemessgerätes oder ein separates Messgerät sein.

- die Einrichtungen zur Erkennung und Anzeige von Funktionsstörungen und Bedienungsfehlern.

Das Dichtemessgerät kann eine Einrichtung zur Thermostatierung der Flüssigkeit besitzen.

Die Funktionseinheiten eines Dichtemessgerätes können in einem Gerät enthalten oder räumlich voneinander getrennt sein.

Elektronische Baugruppen müssen so ausgeführt sein, dass Funktionsfehler deutlich erkennbar sind oder als Funktionsstörung angezeigt werden.

### 2.2 Temperaturmesseinrichtung

Ist die Temperaturmesseinrichtung Bestandteil des Dichtemessgerätes, müssen die verwendeten Temperaturmessfühler vor dem Einbau

- auf nationale Normale rückführbar kalibriert sein.

Die zertifizierte Messunsicherheit der Temperaturmessfühler ergibt sich für ein Vertrauensniveau von 95 % ( $k = 2$ ) durch Multiplikation der Eichfehlergrenze des Dichtemessgerätes mit dem Faktor  $0,1 \text{ °C m}^3 / \text{kg}$  oder  $100 \text{ °C cm}^3 / \text{g}$ .

- im vorgesehenen Arbeitsbereich der Temperatur auf thermische Stabilität geprüft sein.

Ist die Einrichtung zur Messung der Flüssigkeitstemperatur ein separates Messgerät, muss dieses geeicht sein; die Eichfehlergrenze dieses Temperaturmessgerätes darf nicht größer sein als die mit dem Faktor  $0,1 \text{ °C m}^3 / \text{kg}$  oder  $100 \text{ °C cm}^3 / \text{g}$  multiplizierte Eichfehlergrenze des Dichtemessgerätes.

Der Temperaturfühler im Dichtemessgerät muss so eingebaut bzw. ein separates Temperaturmessgerät so angeordnet sein, dass ein guter thermischer Kontakt zur Flüssigkeit gewährleistet ist. Die Abweichung zwischen der angezeigten und der tatsächlichen Flüssigkeitstemperatur darf nicht größer sein als die mit dem Faktor  $0,2 \text{ °C m}^3 / \text{kg}$  oder  $200 \text{ °C cm}^3 / \text{g}$  multiplizierte Eichfehlergrenze des Dichtemessgerätes.

### 2.3 Anzeigeeinrichtungen

Die Anzeigeeinrichtungen sind so zu gestalten, dass

- die Dichte in  $\text{kg/m}^3$  oder  $\text{g/cm}^3$  mit Angabe der Maßeinheit angezeigt wird.

Die Auflösung der Dichteanzeige muss bei einer Ziffernskale  $1/10$  der Eichfehlergrenze des Dichtemessgerätes betragen.

Bei einer Strichskale muss der Teilstrichabstand mindestens 1 mm sein, so dass  $1/10$  des Skalenteilungswertes abgeschätzt werden kann.

- die Periodendauer oder die Frequenz abrufbar angezeigt wird und eindeutig von der Anzeige der Dichte zu unterscheiden ist.
- die Temperatur der Flüssigkeit in  $^{\circ}\text{C}$  mit Angabe der Maßeinheit angezeigt wird.
- Funktionsstörungen angezeigt werden.
- die Gerätekosten abrufbar angezeigt werden.

Weitere Gerätedaten können abrufbar angezeigt werden.

### 2.4 Zusatzeinrichtungen, Datenübertragung

Besteht das Dichtemessgerät aus mehreren, räumlich getrennten Funktionseinheiten oder sind Zusatzeinrichtungen angeschlossen, müssen die Daten unverändert und nicht beeinflussbar übertragen werden.

Zusatzeinrichtungen zur Darstellung der Messdaten müssen diese unverändert und nicht beeinflussbar wiedergeben.

Die Schnittstellen, Datenübertragungs- und Zusatzeinrichtungen müssen eindeutig festgelegt sein und rückwirkungsfrei arbeiten, d.h. sie dürfen die Daten nicht beeinflussen und keine Funktionsfehler verursachen.

Weichen die Schnittstellen, Datenübertragungs- und Zusatzeinrichtungen von den Festlegungen ab oder arbeiten sie fehlerhaft, muss die Anzeige der Messdaten als ungültig erkennbar sein.

## 2.5 Störfestigkeit

Das Dichtemessgerät muss bei

- Einfluss elektromagnetischer Felder (Frequenzbereich 80 MHz bis 1000 MHz, elektrische Feldstärke 3 V/m, 80 % amplitudenmoduliert mit 1 kHz Sinus)
- Entladung statischer Elektrizität (6 kV bei Kontaktentladung, 8 kV bei Luftentladung)

ohne Funktionsstörung arbeiten oder mit eindeutig als ungültig erkennbaren Anzeigen reagieren.

Ist das Dichtemessgerät netzspannungsbetrieben, muss dieses bei

- kurzzeitigen Netzspannungsunterbrechungen (200 ms)
- Einwirkung von Burst-Impulsen (1 kV auf Stromversorgungsleitungen; 0,5 kV auf den übrigen Leitungen)
- Netzspannungsschwankungen (+10 % und -15 % der Nennspannung)
- Einfluss netzspannungsüberlagerter Sinusspannungen (Frequenzbereich 150 kHz bis 80 MHz; Effektivwert der Spannung 3 V; 80 % amplitudenmoduliert mit 1 kHz Sinus)

ohne Funktionsstörung arbeiten oder mit eindeutig als ungültig erkennbaren Anzeigen reagieren.

Bei einem batteriebetriebenen Dichtemessgerät müssen bei Unter- oder Überschreiten der Betriebsspannung die Anzeigen eindeutig als ungültig erkennbar sein.

## 2.6 Fehlergrenzen

Die Eichfehlergrenze der Dichtemessgeräte beträgt bei

- einer Ziffernskale 10 Ziffernschritte und
- einer Strichskale 1 Skalenteilungswert,

jedoch höchstens  $1 \text{ kg/m}^3$  oder  $0,001 \text{ g/cm}^3$ .

## 3 Gebrauchsanweisung, Aufschriften

### 3.1 Gebrauchsanweisung

Jedem Dichtemessgerät muss eine Gebrauchsanweisung beigegeben sein, in der Angaben

- zu den Transport- und Lagerbedingungen
- zu den Aufstell- oder Einbaubedingungen, einschließlich der Umgebungsbedingungen und sofern erforderlich der Einbaulage, des Betriebes im Haupt- oder Nebenstrom und von Probenahmesystemen
- zur Inbetriebnahme und Wartung des Dichtemessgerätes
- zu Sicherheitsvorschriften beim Umgang mit dem Dichtemessgerät
- zur Justierung des Dichtemessgerätes (Bestimmung und Einstellen von Gerätekonstanten)
- zur Messung der Dichte der Flüssigkeit
- zur Messung der Temperatur der Flüssigkeit
- zur Einstellung der Temperatur, falls das Dichtemessgerät über eine Einrichtung zur Thermostatierung der Flüssigkeit verfügt
- zu den Arbeitsbereichen der Dichte, der Temperatur, der Viskosität, des Druckes und des Durchflusses, in denen die Bauart des Dichtemessgerätes zur Eichung zugelassen ist
- zur Messunsicherheit, Auflösung, Wiederholbarkeit sowie zeitlichen Stabilität in den Arbeitsbereichen
- zu den Formeln zur Berechnung der Gerätekonstanten und zur Berechnung der Dichte
- zur Reinigung und zu geeigneten Reinigungsmitteln

- zur Vermeidung von Bedienungs- und Messfehlern
  - zu den Flüssigkeiten, die mit dem Dichtemessgerät in Kontakt kommen dürfen
  - zu den zulässigen Umgebungsbedingungen
  - zu den zulässigen Erschütterungen
  - zu den Fehlermeldungen
- enthalten sind.

Ist das Dichtemessgerät für den kontinuierlichen Messbetrieb vorgesehen, sind in der Gebrauchsanweisung die zulässigen zeitlichen Dichte- und Temperaturänderungen anzugeben.

### **3.2 Aufschriften**

Es müssen an leicht zugänglicher Stelle

- das Zeichen des Herstellers und/oder Händlers
  - die Typbezeichnung
  - die Geräte- oder Fabrikationsnummer
  - das Zulassungszeichen
- angebracht sein.

Die Änderung der Dichte, die bei einer Ziffernskale dem Ziffernschritt oder bei einer Strichskale dem Teilstrichabstand entspricht, ist auf dem Dichtemessgerät anzugeben.

Die Arbeitsbereiche der Dichte, der Temperatur, der Viskosität, des Druckes und des Durchflusses, für die die Bauart des Dichtemessgerätes zur Eichung zugelassen ist, sind auf dem Dichtemessgerät anzugeben (§ 42 Abs. 3 EO).

Ist das Dichtemessgerät für Messungen mit durchströmenden Flüssigkeiten vorgesehen, ist die Durchströmrichtung anzugeben.

Besteht das Dichtemessgerät aus mehreren, räumlich voneinander getrennten Funktionseinheiten oder sind diese austauschbar, sind sie ebenfalls mit den für sie zutreffenden, oben angeführten Aufschriften zu versehen.

## **4 Zulassung**

Zu prüfen sind die Einhaltung der Forderungen an:

- die Messrichtigkeit in den zur Eichung vorgesehenen Arbeitsbereichen der Dichte, der Viskosität, der Temperatur, des Druckes und des Durchflusses.
- die Funktionseinheiten (Abschnitt 2.1).
- die Temperaturmesseinrichtung (Abschnitt 2.2).
- die Darstellung der Messwerte und Daten (Abschnitt 2.3).
- die Zusatzeinrichtungen, Geräteverbindungen und die Datenübertragung (Abschnitt 2.4).
- die Störfestigkeit (Abschnitt 2.5).
- die Gebrauchsanweisung (Abschnitt 3.1) und die Aufschriften (Abschnitt 3.2).
- die Stempelstellen (Abschnitt 5.4).
- den Schutz gegen Verunreinigung.
- den Schutz gegen Eingriffe und Bedienungsfehler.

Weiterhin sind zu prüfen:

- die Qualität der Herstellung und Konstruktion der Dichtemesszelle.
- die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Dichtemessungen in den Arbeitsbereichen.
- die zeitliche Stabilität des schwingungsfähigen Systems.
- die Abhängigkeit der Dichtemessergebnisse von Temperatur, Viskosität, Druck und Durchfluss in den Arbeitsbereichen sowie deren Abhängigkeit von Erschütterungen und der Einbaulage des Dichtemeßsystems.
- die Fähigkeit, zeitliche Änderungen der Charakteristika des Meßsystems und elektronischer Baugruppen zu erkennen und anzuzeigen.
- die Fähigkeit, Bedienungsfehler zu erkennen und anzuzeigen.

Ist eine Thermostatiereinrichtung vorhanden, sind deren thermische und regelungstechnische

Eigenschaften und das Zusammenwirken mit der Messablaufsteuerung zu prüfen.

Sofern erforderlich, werden in einer Eichanweisung über die Festlegungen des Abschnitts 5 hinausgehende Details zur Eichung und Wartung geregelt.

## **5 Eichung und Wartung**

### **5.1 Wartung**

Die Dichtemessgeräte müssen unter den Bedingungen, mit den Maßnahmen und innerhalb der Fristen, die in der Gebrauchsanweisung festgelegt sind, gewartet werden. Die Wartung muss durch einen Wartungsdienst oder durch fachkundiges Personal des Messgerätebetreibers erfolgen; sie ist zu dokumentieren und auf dem Dichtemessgerät zu kennzeichnen.

Die Wartungsfristen können bauartspezifisch in der Gebrauchsanweisung sowie anwendungsspezifisch durch die zuständige Eichbehörde oder durch den Messgerätebetreiber in Abstimmung mit der zuständigen Eichbehörde festgelegt werden.

Sofern erforderlich, ist das Dichtemessgerät entsprechend Gebrauchsanweisung zu justieren (Bestimmung und Einstellung der Gerätekonstanten).

Die vom Hersteller oder bei der Wartung bestimmten Gerätekonstanten sind schriftlich festzuhalten und auf dem Dichtemessgerät kenntlich zu machen, oder im Dichtemessgerät nichtlöschar elektronisch zu speichern.

Luft oder Vakuum kann zur Justierung sowie zur Funktionskontrolle des Dichtemessgerätes verwendet werden, sofern das gemäß Gebrauchsanweisung zulässig ist.

### **5.2 Vorprüfung**

Ist die Eichung des Dichtemessgerätes nur am Gebrauchsort möglich, so kann durch die zuständige Eichbehörde eine Vorprüfung festgelegt werden. Die Prüfpunkte und die Vorgehensweise entsprechen der eichtechnischen Prüfung.

Vorgeprüfte Dichtemessgeräte sind am Gebrauchsort für die Arbeitsbereiche der Dichte, der Viskosität, der Temperatur, des Druckes und des Durchflusses, in denen die eichpflichtige Messung erfolgt, zu eichen. Dafür ist entweder

- eine Probenahme des Messgutes vorzusehen und dessen Dichte in den Arbeitsbereichen der Temperatur, des Druckes und des Durchflusses, in denen die eichpflichtige Messung erfolgt, auf nationale Normale rückführbar zu ermitteln oder
- eine zusätzliche Dichtemesseinrichtung, z.B. ein Druckpyknometer, vorzusehen, mit dem im Prozess die Dichte des Messgutes auf nationale Normale rückführbar bestimmt werden kann.

### **5.3 Eichung**

Herrichtung vor der Eichung:

Das Dichtemessgerät ist vor der Eichung durch fachkundiges Personal durch folgende Maßnahmen herzurichten:

- Funktionskontrolle des Dichtemessgerätes.
- Reinigung der schwingungsfähigen Anordnung.
- Justierung des Dichtemessgerätes entsprechend der Gebrauchsanweisung.

Die dabei bestimmten Gerätekonstanten sind festzuhalten und auf dem Dichtemessgerät kenntlich zu machen, oder im Dichtemessgerät nichtlöschar elektronisch zu speichern.

Luft oder Vakuum kann zur Justierung sowie zur Funktionskontrolle des Dichtemessgerätes verwendet werden, sofern das gemäß Gebrauchsanweisung zulässig ist.

Wartungsergebnisse:

Die dokumentierten Wartungsergebnisse sind bei der Eichung vorzulegen und auszuwerten.

Bei der Auswertung ist festzustellen, ob die Verkehrsfehlergrenze innerhalb der Nacheichfrist eingehalten wurde.

Beschaffenheitsprüfung:

Es ist eine Beschaffenheitsprüfung durchzuführen, bei der insbesondere zu prüfen ist:

- ob die in der Zulassung festgelegte Gebrauchsanweisung vorhanden und gemäß Abschnitt 3.1 vollständig ist.
- ob die festgelegten Aufschriften gemäß Abschnitt 3.2 vorhanden und unversehrt sind.

Eichtechnische Prüfung:

Bei der eichtechnischen Prüfung sind die Messabweichungen der angezeigten Dichten geeigneter Prüfflüssigkeiten (Abschnitt 6) von deren zugehörigen zertifizierten Dichtewerten festzustellen.

Die angezeigten Dichten gelten für die am Dichtemessgerät angezeigten Flüssigkeitstemperaturen.

Die eichtechnische Prüfung ist in den Arbeitsbereichen der Dichte, der Temperatur, der Viskosität, des Druckes und des Durchflusses durchzuführen, in denen die Bauart des Dichtemessgerätes zugelassen ist.

Dabei sind die Prüfpunkte in den Arbeitsbereichen der Dichte und der Temperatur nahe der unteren und oberen Grenze sowie in der Mitte des Arbeitsbereiches der Dichte jeweils bei Temperaturen, die nahe der unteren und oberen Grenze sowie in der Mitte des Arbeitsbereiches der Temperatur liegen, zu wählen.

Schließt der Temperaturarbeitsbereich die Temperatur 20 °C ein, ist bei dieser Temperatur ein Prüfpunkt zu wählen.

Die Messabweichungen sind an jedem Prüfpunkt dreimal zu bestimmen; dabei dürfen diese an jedem Prüfpunkt die Eichfehlergrenze nicht mehr als einmal überschreiten.

Sind in Eichanweisungen, die Bestandteil der Zulassung sind, bauartspezifische Einzelheiten der eichtechnischen Prüfung festgelegt, können dort weitere Prüfpunkte, z.B. bezüglich der Arbeitsbereiche der Viskosität, des Druckes und des Durchflusses gefordert sein.

#### **5.4 Stempelung**

An leicht zugänglicher Stelle des Dichtemessgerätes ist eine Stempelstelle vorzusehen, an der der Hauptstempel angebracht wird.

Besteht das Dichtemessgerät aus mehreren, räumlich getrennten Funktionseinheiten, sind Funktionselemente leicht austauschbar oder sind Einstellelemente zugänglich, müssen diese Einrichtungen zusätzlich durch Sicherungsstempel oder Plomben gesichert sein.

### **6 Prüfflüssigkeiten**

Für Prüfungen sind Prüfflüssigkeiten zu verwenden, deren Dichten in den Arbeitsbereichen der Temperatur, der Viskosität, des Druckes und des Durchflusses, in denen Prüfungen durchzuführen sind, bekannt sind.

Die Dichtewerte der Prüfflüssigkeiten müssen auf nationale Normale rückführbar bestimmt und mit einer Unsicherheit zertifiziert sein, die für ein Vertrauensniveau von 95 % ( $k = 2$ ) nicht mehr als das 0,3fache der Eichfehlergrenzen des zu prüfenden Dichtemessgerätes beträgt.

Wird entionisiertes oder destilliertes Wasser als Prüfflüssigkeit verwendet, ist die Qualität des hergestellten Wassers regelmäßig zu kontrollieren; diese Kontrollen sind nachzuweisen. Die Dichtewerte des entionisierten oder bi-destillierten Wassers sind der Anlage zu entnehmen.

Die Prüfflüssigkeiten sind so auszuwählen, dass ihre Eigenschaften den Anforderungen nahe kommen, die dem eichpflichtigen Einsatz des Messgerätes entsprechen.

## Anlage 1

Die Dichte  $\rho_W$  von reinem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur  $t_{90}$  nach der Internationalen Temperaturskala von 1990

$t_{90}$ °C	,0	,1	,2	3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	$t_{90}$ °C
<b>Wasserdichte <math>\rho_W</math> in kg/m<sup>3</sup></b>											
0	999,84	999,85	999,85	999,86	999,87	999,87	999,88	999,88	999,89	999,89	0
1	999,90	999,90	999,91	999,91	999,92	999,92	999,93	999,93	999,93	999,94	1
2	999,94	999,94	999,95	999,95	999,95	999,95	999,96	999,96	999,96	999,96	2
3	999,96	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	3
4	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	999,97	4
5	999,96	999,96	999,96	999,96	999,96	999,95	999,95	999,95	999,95	999,94	5
6	999,94	999,94	999,93	999,93	999,93	999,92	999,92	999,91	999,91	999,91	6
7	999,90	999,90	999,89	999,89	999,88	999,88	999,87	999,87	999,86	999,85	7
8	999,85	999,84	999,84	999,83	999,82	999,82	999,81	999,80	999,80	999,79	8
9	999,78	999,77	999,77	999,76	999,75	999,74	999,73	999,73	999,72	999,71	9
10	999,70	999,69	999,68	999,67	999,66	999,65	999,64	999,63	999,62	999,61	10
11	999,60	999,59	999,58	999,57	999,56	999,55	999,54	999,53	999,52	999,51	11
12	999,50	999,49	999,47	999,46	999,45	999,44	999,43	999,41	999,40	999,39	12
13	999,38	999,36	999,35	999,34	999,33	999,31	999,30	999,29	999,27	999,26	13
14	999,24	999,23	999,22	999,20	999,19	999,17	999,16	999,14	999,13	999,11	14
15	999,10	999,08	999,07	999,05	999,04	999,02	999,01	998,99	998,97	998,96	15
16	998,94	998,93	998,91	998,89	998,88	998,86	998,84	998,83	998,81	998,79	16
17	998,77	998,76	998,74	998,72	998,70	998,69	998,67	998,65	998,63	998,61	17
18	998,59	998,58	998,56	998,54	998,52	998,50	998,48	998,46	998,44	998,42	18
19	998,40	998,38	998,36	998,35	998,33	998,31	998,28	998,26	998,24	998,22	19
20	998,20	998,18	998,16	998,14	998,12	998,10	998,08	998,06	998,03	998,01	20
21	997,99	997,97	997,95	997,93	997,90	997,88	997,86	997,84	997,81	997,79	21
22	997,77	997,75	997,72	997,70	997,68	997,65	997,63	997,61	997,58	997,56	22
23	997,54	997,51	997,49	997,47	997,44	997,42	997,39	997,37	997,34	997,32	23
24	997,30	997,27	997,25	997,22	997,20	997,17	997,15	997,12	997,09	997,07	24
25	997,04	997,02	996,99	996,97	996,94	996,91	996,89	996,86	996,84	996,81	25
26	996,78	996,76	996,73	996,70	996,67	996,65	996,62	996,59	996,57	996,54	26
27	996,51	996,48	996,46	996,43	996,40	996,37	996,34	996,32	996,29	996,26	27
28	996,23	996,20	996,17	996,15	996,12	996,09	996,06	996,03	996,00	995,97	28
30	995,64	995,61	995,58	995,55	995,52	995,49	995,46	995,43	995,40	995,37	30
31	995,34	995,31	995,28	995,25	995,21	995,18	995,15	995,12	995,09	995,06	31
32	995,02	994,99	994,96	994,93	994,90	994,86	994,83	994,80	994,77	994,73	32
33	994,70	994,67	994,63	994,60	994,57	994,54	994,50	994,47	994,44	994,40	33
34	994,37	994,34	994,30	994,27	994,23	994,20	994,17	994,13	994,10	994,06	34
35	994,03	993,99	993,96	993,93	993,89	993,86	993,82	993,79	993,75	993,72	35
36	993,68	993,65	993,61	993,58	993,54	993,50	993,47	993,43	993,40	993,36	36
37	993,33	993,29	993,25	993,22	993,18	993,14	993,11	993,07	993,04	993,00	37
38	992,96	992,93	992,89	992,85	992,81	992,78	992,74	992,70	992,67	992,63	38
39	992,59	992,55	992,52	992,48	992,44	992,40	992,36	992,33	992,29	992,25	39
40	992,21	992,17	992,14	992,10	992,06	992,02	991,98	991,94	991,90	991,86	40
°C	,0	,1	,2	3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	°C

Die Dichte  $\rho_W$  von reinem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur  $t_{90}$  nach der Internationalen Temperaturskala von 1990

$t_{90}$ °C	,0	,1	,2	3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	$t_{90}$ °C
<b>Wasserdichte <math>\rho_W</math> in kg/m<sup>3</sup></b>											
40	992,21	992,17	992,14	992,10	992,06	992,02	991,98	991,94	991,90	991,86	40
41	991,83	991,79	991,75	991,71	991,67	991,63	991,59	991,55	991,51	991,47	41
42	991,43	991,39	991,35	991,31	991,27	991,23	991,19	991,15	991,11	991,07	42
43	991,03	990,99	990,95	990,91	990,87	990,83	990,79	990,75	990,71	990,66	43
44	990,62	990,58	990,54	990,50	990,46	990,42	990,38	990,33	990,29	990,25	44
45	990,21	990,17	990,12	990,08	990,04	990,00	989,96	989,91	989,87	989,83	45
46	989,79	989,74	989,70	989,66	989,62	989,57	989,53	989,49	989,44	989,40	46
47	989,36	989,31	989,27	989,23	989,18	989,14	989,10	989,05	989,01	988,97	47
48	988,92	988,88	988,83	988,79	988,75	988,70	988,66	988,61	988,57	988,52	48
49	988,48	988,43	988,39	988,35	988,30	988,26	988,21	988,17	988,12	988,08	49
50	988,03	987,99	987,94	987,89	987,85	987,80	987,76	987,71	987,67	987,62	50
51	987,57	987,53	987,48	987,44	987,39	987,34	987,30	987,25	987,21	987,16	51
52	987,11	987,07	987,02	986,97	986,93	986,88	986,83	986,79	986,74	986,69	52
53	986,64	986,60	986,55	986,50	986,46	986,41	986,36	986,31	986,26	986,22	53
54	986,17	986,12	986,07	986,03	985,98	985,93	985,88	985,83	985,79	985,74	54
55	985,69	985,64	985,59	985,54	985,49	985,45	985,40	985,35	985,30	985,25	55
56	985,20	985,15	985,10	985,05	985,00	984,96	984,91	984,86	984,81	984,76	56
57	984,71	984,66	984,61	984,56	984,51	984,46	984,41	984,36	984,31	984,26	57
58	984,21	984,16	984,11	984,06	984,01	983,96	983,91	983,85	983,80	983,75	58
59	983,70	983,65	983,60	983,55	983,50	983,45	983,40	983,34	983,29	983,24	59
60	983,19	983,14	983,09	983,04	982,98	982,93	982,88	982,83	982,78	982,73	60
61	982,67	982,62	982,57	982,52	982,46	982,41	982,36	982,31	982,26	982,20	61
62	982,15	982,10	982,04	981,99	981,94	981,89	981,83	981,78	981,73	981,67	62
63	981,62	981,57	981,51	981,46	981,41	981,35	981,30	981,25	981,19	981,14	63
64	981,09	981,03	980,98	980,92	980,87	980,82	980,76	980,71	980,65	980,60	64
65	980,55	980,49	980,44	980,38	980,33	980,27	980,22	980,16	980,11	980,05	65
66	980,00	979,94	979,89	979,83	979,78	979,72	979,67	979,61	979,56	979,50	66
67	979,45	979,39	979,34	979,28	979,23	979,17	979,11	979,06	979,00	978,95	67
68	978,89	978,83	978,78	978,72	978,67	978,61	978,55	978,50	978,44	978,38	68
69	978,33	978,27	978,21	978,16	978,10	978,04	977,99	977,93	977,87	977,82	69
70	977,76	977,70	977,64	977,59	977,53	977,47	977,42	977,36	977,30	977,24	70
71	977,19	977,13	977,07	977,01	976,95	976,90	976,84	976,78	976,72	976,66	71
72	976,61	976,55	976,49	976,43	976,37	976,31	976,26	976,20	976,14	976,08	72
73	976,02	975,96	975,90	975,85	975,79	975,73	975,67	975,61	975,55	975,49	73
74	975,43	975,37	975,31	975,25	975,19	975,14	975,08	975,02	974,96	974,90	74
75	974,84	974,78	974,72	974,66	974,60	974,54	974,48	974,42	974,36	974,30	75
76	974,24	974,18	974,12	974,06	974,00	973,93	973,87	973,81	973,75	973,69	76
77	973,63	973,57	973,51	973,45	973,39	973,33	973,27	973,20	973,14	973,08	77
78	973,02	972,96	972,90	972,84	972,78	972,71	972,65	972,59	972,53	972,47	78
79	972,41	972,34	972,28	972,22	972,16	972,10	972,03	971,97	971,91	971,85	79
80	971,78	971,72	971,66	971,60	971,53	971,47	971,41	971,35	971,28	971,22	80
°C	,0	,1	,2	3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	°C

Die Dichte  $\rho_W$  von reinem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur  $t_{90}$  nach der Internationalen Temperaturskala von 1990

$t_{90}$ °C	,0	,1	,2	3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	$t_{90}$ °C
<b>Wasserdichte <math>\rho_W</math> in kg/m<sup>3</sup></b>											
80	971,78	971,72	971,66	971,60	971,53	971,47	971,41	971,35	971,28	971,22	80
81	971,16	971,10	971,03	970,97	970,91	970,84	970,78	970,72	970,65	970,59	81
82	970,53	970,46	970,40	970,34	970,27	970,21	970,15	970,08	970,02	969,96	82
83	969,89	969,83	969,76	969,70	969,64	969,57	969,51	969,44	969,38	969,32	83
84	969,25	969,19	969,12	969,06	968,99	968,93	968,86	968,80	968,74	968,67	84
85	968,61	968,54	968,48	968,41	968,35	968,28	968,22	968,15	968,09	968,02	85
86	967,96	967,89	967,82	967,76	967,69	967,63	967,56	967,50	967,43	967,37	86
87	967,30	967,23	967,17	967,10	967,04	966,97	966,90	966,84	966,77	966,71	87
88	966,64	966,57	966,51	966,44	966,37	966,31	966,24	966,17	966,11	966,04	88
89	965,97	965,91	965,84	965,77	965,71	965,64	965,57	965,51	965,44	965,37	89
90	965,30	965,24	965,17	965,10	965,03	964,97	964,90	964,83	964,76	964,70	90
91	964,63	964,56	964,49	964,43	964,36	964,29	964,22	964,15	964,09	964,02	91
92	963,95	963,88	963,81	963,75	963,68	963,61	963,54	963,47	963,40	963,33	92
93	963,27	963,20	963,13	963,06	962,99	962,92	962,85	962,78	962,71	962,65	93
94	962,58	962,51	962,44	962,37	962,30	962,23	962,16	962,09	962,02	961,95	94
95	961,88	961,81	961,74	961,67	961,60	961,53	961,46	961,39	961,32	961,25	95
96	961,18	961,11	961,04	960,97	960,90	960,83	960,76	960,69	960,62	960,55	96
97	960,48	960,41	960,34	960,27	960,20	960,13	960,06	959,99	959,92	959,85	97
98	959,77	959,70	959,63	959,56	959,49	959,42	959,35	959,28	959,20	959,13	98
99	959,06	958,99	958,92	958,85	958,78	958,70	958,63	958,56	958,49	958,42	99
100	958,34										100
°C	,0	,1	,2	3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	°C

Literatur:

Bettin, H.; Spieweck, F.:

Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala von 1990.

PTB-Mitteilungen 100(1990)3, S. 195 - 196

Kell, G. S.:

Density, Thermal Expansivity, and Compressibility of Liquid Water from 0 ° to 150 °C: Correlations and Tables for Atmospheric Pressure and Saturation Reviewed and Expressed on 1968 Temperature Scale.

Journal of Chemical and Engineering Data 20(1975)1, S. 97 -105

Anlage 2

Die isotherme Kompressibilität  $\kappa_W$  von reinem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur  $t_{90}$  nach der Internationalen Temperaturskala von 1990

$t_{90}$ °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$t_{90}$ °C
<b>Isotherme Kompressibilität <math>\kappa_W</math> in <math>10^{-6} \text{ bar}^{-1}</math></b>											
0	<b>50,88</b>	<b>50,51</b>	<b>50,15</b>	<b>49,81</b>	<b>49,48</b>	<b>49,17</b>	<b>48,87</b>	<b>48,59</b>	<b>48,31</b>	<b>48,06</b>	0
10	<b>47,81</b>	<b>47,57</b>	<b>47,35</b>	<b>47,13</b>	<b>46,93</b>	<b>46,73</b>	<b>46,55</b>	<b>46,37</b>	<b>46,20</b>	<b>46,04</b>	10
20	<b>45,89</b>	<b>45,75</b>	<b>45,61</b>	<b>45,48</b>	<b>45,36</b>	<b>45,25</b>	<b>45,14</b>	<b>45,04</b>	<b>44,94</b>	<b>44,85</b>	20
30	<b>44,77</b>	<b>44,69</b>	<b>44,62</b>	<b>44,56</b>	<b>44,50</b>	<b>44,44</b>	<b>44,39</b>	<b>44,34</b>	<b>44,30</b>	<b>44,27</b>	30
40	<b>44,24</b>	<b>44,21</b>	<b>44,19</b>	<b>44,17</b>	<b>44,16</b>	<b>44,15</b>	<b>44,15</b>	<b>44,15</b>	<b>44,15</b>	<b>44,16</b>	40
50	<b>44,17</b>	<b>44,19</b>	<b>44,21</b>	<b>44,23</b>	<b>44,26</b>	<b>44,29</b>	<b>44,32</b>	<b>44,36</b>	<b>44,40</b>	<b>44,45</b>	50
60	<b>44,50</b>	<b>44,55</b>	<b>44,60</b>	<b>44,66</b>	<b>44,72</b>	<b>44,79</b>	<b>44,86</b>	<b>44,93</b>	<b>45,00</b>	<b>45,08</b>	60
70	<b>45,16</b>	<b>45,25</b>	<b>45,34</b>	<b>45,43</b>	<b>45,52</b>	<b>45,62</b>	<b>45,72</b>	<b>45,82</b>	<b>45,92</b>	<b>46,03</b>	70
80	<b>46,15</b>	<b>46,26</b>	<b>46,38</b>	<b>46,50</b>	<b>46,62</b>	<b>46,75</b>	<b>46,88</b>	<b>47,01</b>	<b>47,15</b>	<b>47,29</b>	80
90	<b>47,43</b>	<b>47,58</b>	<b>47,73</b>	<b>47,88</b>	<b>48,03</b>	<b>48,19</b>	<b>48,35</b>	<b>48,51</b>	<b>48,68</b>	<b>48,85</b>	90
100	<b>49,02</b>										100
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C

Die Wasserdichte ist in Abhängigkeit des Druckes nach der Formel

$$\rho_W(t, p) = \rho_W(t, p_0) [1 + \kappa_W (p - p_0)]$$

t	Temperatur (ITS 90)
p	Druck
$p_0$	Bezugsdruck ( $p_0 = 1,013 \text{ bar}$ )
$\kappa_W$	Kompressibilität
$\rho_W(t, p)$	Dichte bei der Temperatur t und dem Druck p
$\rho_W(t, p_0)$	Dichte bei der Temperatur t und dem Bezugsdruck $p_0$ (siehe Anlage 1)

zu berechnen.

Literatur:

Kell, G. S.:

Density, Thermal Expansivity, and Compressibility of Liquid Water from 0 ° to 150 °C: Correlations and Tables for Atmospheric Pressure and Saturation Reviewed and Expressed on 1968 Temperature Scale.

Journal of Chemical and Engineering Data. 20(1975)1, S. 97 -105