



BIBLIOTHEK DES TECHNISCHEN WISSENS

Wärmelehre

Technische Physik Band 3

von Horst Herr

4. Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 50619

Autor:

Horst Herr, VDI, Dipl.-Ing., Fachoberlehrer
65779 Kelkheim/Taunus

Lektorat:

Walter Bierwerth, Dipl.-Ing., Studiendirektor
65817 Eppstein/Taunus

Umschlaggestaltung und Bildbearbeitung:

Michael M. Kappenstein, Frankfurt

Das vorliegende Buch wurde auf der **Grundlage der neuen amtlichen Rechtschreibregeln** erstellt.

4. Auflage 2006

Druck 5 4 3 2

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-5064-9

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2006 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten,
[www://www.europa-lehrmittel.de](http://www.europa-lehrmittel.de)

Satz und Druck: Tutte Druckerei GmbH, Salzweg

Vorwort

*Dasselbe Ziel muss sowohl der Lehrende
wie der Lernende haben:
jener, dass er nützen,
dieser, dass er Nutzen ziehen will.*

Pythagoras von Samos

Was wir heute mit Wärme bezeichnen, nannten die alten Griechen um etwa 200 v. Chr. Feuer. Dieses Feuer zählten sie zu den vier Grundelementen, d. h., dass dem Feuer eine stoffliche Substanz zugeschrieben wurde. Noch bis in das 19. Jahrhundert wurde die Wärme als ein gewichtsloser Stoff angesehen. Man kannte auch schon im alten Griechenland die „Kraft des Feuers“ und war in der Lage, mit Wasserdampf Kräfte zu erzeugen. Dennoch entwickelten sich erst ab etwa 1600 die Wissensgebiete der **Mechanik** und der

Wärmelehre

Diese Entwicklungen verliefen größtenteils unabhängig voneinander. Erst die Erkenntnis, dass Wärme in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann, führte etwa 200 Jahre später zur Vereinigung von Mechanik und Wärmelehre, zur **Wärmemechanik**, die wir heute als

Thermodynamik

bezeichnen. Die Wärmelehre ist ebenso wie die **Mechanik der festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe**, d. h. der **Technischen Mechanik** und der **Fluidmechanik** ein Teilgebiet der Physik, welches heute ganz selbstverständlich zur Lösung technischer Probleme herangezogen wird. Im Maschinen- und Anlagenbau sind

**Technische Mechanik,
Fluidmechanik und
Thermodynamik**

die unverzichtbaren „Standbeine“ für beinahe alle Anwendungsfächer. Ohne diese Grundlagen, deren Gesetze oftmals fließend ineinander übergehen, ist kaum eine technische Anwendung denkbar. Das Anwenden der Gesetze dieser Wissensgebiete ist in den folgenden Bereichen der Technik gleichermaßen relevant:

Bautechnik
Energietechnik
Gesundheitstechnik
Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
Kältetechnik
Maschinentechnik
Sanitär- und Haustechnik
Umwelttechnik
Verfahrenstechnik u. a.

Umfang, Auswahl und Darbietung der Lerninhalte dieses Buches orientieren sich an den Lehrplänen der Zweijährigen Fachschulen (**Technikerschulen**) obiger Fachrichtungen der Kultusministerien der Bundesländer. Da es sich um **physikalisches Grundlagenwissen** handelt, ist dieses Lehrbuch auch im Unterricht der **Technischen Gymnasien**, der **Fachoberschulen Technik** und für die **berufliche Fortbildung** einsetzbar. Den Studenten der Fachhochschulen oder Technischen Universitäten erleichtert das Durcharbeiten dieses Buches das Verständnis ihrer Vorlesungen. Für sie und alle anderen, die im **Selbststudium** alte Kenntnisse erneuern oder neue erwerben wollen, sind die Lektionen nach einem einheitlichen Schema aufgebaut. Dieses wird nachfolgend erläutert.

Vorwort zur 4. Auflage

Es wurden lediglich Druckfehler verbessert und aktuelle Normen übernommen.

Zur Arbeit mit diesem Buch

Soll es **unterrichtsbegleitend** verwendet werden, so findet der Lernende hier die im Unterricht erläuterten Erkenntnisse und Zusammenhänge und die daraus resultierenden Formeln in den thematisch ausgerichteten Lektionen. Während die Übungsaufgaben mit dem **Lösungsanhang** je nach Kenntnisstand der häuslichen Nacharbeit dienen, wählt der Dozent aus den Vertiefungsaufgaben diejenigen aus, die seinen Intentionen entsprechen.

Beim **Selbststudium** ist es möglich, einige Lektionen, die nicht weiterführend sind, auszulassen. Sinnvoll aber ist es, jede Lektion, deren Inhalt man sich aneignen will, vollständig und in der gegebenen Reihenfolge durchzuarbeiten.

Die **Informationen** befinden sich naturgemäß am Beginn der Lektionen, nur in wenigen Fällen sind sie innerhalb der Lektion aufgeteilt. Die Erläuterungen der physikalisch-technischen Zusammenhänge führen in der Regel zu einer oder mehrerer Formeln.

Deren Anwendung erfolgt exemplarisch in **Musteraufgaben (M)**, die gegebenenfalls noch spezielle Kenntnisse vermitteln.



Die darauf folgenden **Übungsaufgaben (Ü)** dienen der Wiederholung und Vertiefung sowie der Überprüfung des Gelernten durch den Studierenden.

Deshalb befinden sich **am Schluss des Buches ausführliche Lösungsgänge**. Diese Buchseiten sind mit einem **roten Randdruck** gekennzeichnet.



Möchte der Lernende sein Wissen weiter vertiefen oder sich auf Prüfungen vorbereiten, löst er zweckmäßig die **Vertiefungsaufgaben (V)**.

Am Schluss des Buches befinden sich die Ergebnisse dieser Vertiefungsaufgaben. Diese Buchseiten sind mit einem **schwarzen Randdruck** gekennzeichnet.

Der pädagogische Zweck dieses Schemas I, M, Ü, V innerhalb jeder Lektion besteht darin, dass der Lernende in mehreren Stufen, d.h. mit einem zunehmendem Grad der Selbständigkeit zum Lehrziel geführt wird. Deshalb musste nach meinem pädagogischen Verständnis auch auf die Lösungsgänge der Vertiefungsaufgaben zwingend verzichtet werden.

Die **Kombination aus Unterricht und Selbststudium**, z. B. in Abendkursen, findet in der Methodik dieses Lehrbuches eine Unterstützung durch die Verlagerung von Unterrichtssequenzen in die Hausarbeit.

Mein besonderer Dank gilt dem Verlag Europa-Lehrmittel, der mir diese Arbeit ermöglicht hat und dessen große Erfahrung ich nutzen durfte. Ich bedanke mich auch beim Lektor dieses Buches, Herrn Dipl.-Ing. Walter Bierwerth und beim Zeichner der Bilder, Herrn Michael Maria Kappenstein für die kreative Zusammenarbeit. Meiner Tochter Christina danke ich für die Erledigung der Reinschrift und für die gewissenhafte Mithilfe bei den Korrekturarbeiten.

Mehr noch als bei der Bearbeitung meiner anderen Unterrichtswerke habe ich bei der Arbeit an diesem Buch an meinen ehemaligen Lehrer

Herrn Direktor Dipl.-Ing. Leonhard Bernard †

gedacht, dem ich sehr viel verdanke und dem ich dieses Buch widme.

Wir, Verfasser und Verlag, wären dem Leser dieses Unterrichtswerkes dankbar, wenn er uns etwaige Fehler nennen und Erfahrungen bei der Arbeit mit dem Buch mitteilen würde.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Wärmezustand	1 bis 60
---------------------------	----------

Lektion 1

Temperatur und Temperaturmessung 1

1.1	Die Temperatur in der menschlichen Empfindung	1
1.2	Die Temperatur als Zustandsgröße	1
1.3	Die Einheit der Temperatur im internationalen Einheitensystem	2
1.3.1	Basisgrößen und abgeleitete Größen	2
1.3.2	Druck als Beispiel einer abgeleiteten Größe	2
1.3.3	Die Temperaturskalen	3
1.3.3.1	Die Celsius-Skala	3
1.3.3.2	Der absolute Nullpunkt und die Kelvin-Skala	5
1.3.3.3	Definition der Temperatureinheit Kelvin	7
1.4	Messung der Temperatur	9
1.4.1	Begriff des indirekten Messens	9
1.4.2	Temperaturmessverfahren, Thermometer	9
1.4.2.1	Flüssigkeitsthermometer	9
1.4.2.2	Bimetallthermometer	10
1.4.2.3	Elektrisches Widerstandsthermometer	10
1.4.2.4	Das Thermoelement	10
1.4.2.5	Pyrometer	10
1.4.2.6	Seegerkegel	11
1.4.2.7	Thermochromfarben	11
1.4.2.8	Die Thermographie	11

Lektion 2

Wärme als Energieform 13

2.1	Der Aufbau der Materie	13
2.1.1	Die atomaren und molekularen Kräfte	13
2.1.2	Kohäsion und Adhäsion	14
2.1.3	Aggregatzustand als Folge der Kohäsionskraft	14
2.1.4	Die Aufbauformen der Stoffe	14
2.1.4.1	Der kristalline Aufbau fester Stoffe	14
2.1.4.2	Der amorphe Aufbau fester Stoffe	15
2.1.4.3	Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe	15
2.2	Wärme als Bewegungsenergie der Atome und Moleküle	15
2.2.1	Energiearten und Energieumwandlungen	15
2.2.2	Die Aufnahme und die Abgabe von Wärmeenergie	16
2.2.2.1	Sensible und latente Wärmeenergie	16
2.2.2.2	Der Unterschied zwischen Temperatur und Wärme	17
2.2.2.3	Die Einheit der Wärmeenergie	17
2.2.2.4	Wärmeenergie und absoluter Nullpunkt	18
2.2.2.5	Die Änderung des Aggregatzustandes und Druckenergie	19

Lektion 3

Wärmeausdehnung fester und flüssiger Stoffe 20

3.1	Wärmeausdehnung fester Körper	20
3.1.1	Begründung der Wärmeausdehnung	20

3.1.2	Längenausdehnung fester Körper	20
3.1.2.1	Der thermische Längenausdehnungskoeffizient	20
3.1.2.2	Berechnung der Längenausdehnung infolge Temperaturdifferenz	21
3.1.3	Volumenausdehnung fester Körper	22
3.2	Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten	24
3.3	Wärmespannung	25

Lektion 4**Wärmeausdehnung von Gasen** 30

4.1	Die Zustandsgrößen der Gase	30
4.1.1	Die Zustandsgrößen als absolute Größen	30
4.1.1.1	Bedeutung der absoluten Temperatur in der Thermodynamik	30
4.1.1.2	Luftdruck und absoluter Druck	31
4.2	Verhalten der Gase bei konstanter Temperatur	32
4.2.1	Gesetz von Boyle-Mariotte	32
4.2.1.1	Die Gasdichte bei konstanter Temperatur	34
4.3	Verhalten der Gase bei veränderlicher Temperatur	34
4.3.1	Gesetze von Gay Lussac	35
4.3.1.1	Temperaturänderung bei konstantem Druck und veränderlichem Volumen	35
4.3.1.2	Temperaturänderung bei konstantem Volumen und veränderlichem Druck	36
4.4	Das vereinigte Gasgesetz	37

Lektion 5**Allgemeine Zustandsgleichung der Gase** 40

5.1	Der Normzustand eines Gases	40
5.1.1	Notwendigkeit eines definierten Gaszustandes	40
5.1.2	Gasdichte	40
5.1.2.1	Die Normdichte von Gasen	40
5.1.2.2	Das spezifische Volumen	40
5.1.2.3	Die Gasdichte in Abhängigkeit von Druck und Temperatur	41
5.2	Spezifische Gaskonstante und allgemeine Zustandsgleichung der Gase	42
5.3	Ideales und reales Gas	43

Lektion 6**Molare Zustände und Größen** 46

6.1	Massenbestimmung der Elementarteilchen	46
6.1.1	Die atomare Masseneinheit	46
6.1.2	Das Mol als Einheit für die Stoffmenge	46
6.1.3	Relative Atommasse und relative Molekülmasse	47
6.1.4	Das Gesetz von Avogadro	48
6.1.4.1	Die molare Masse	48
6.1.4.2	Das molare Normvolumen	49
6.1.4.3	Die Avogadro-Konstante	50
6.2	Die universelle Gaskonstante	51
6.2.1	Berechnung der speziellen Gaskonstanten aus der universellen Gaskonstanten	52

Lektion 7**Mischung idealer Gase** 54

7.1	Gasgemische in technischer Praxis und Umwelt	54
7.2	Die Zustandsgrößen der Mischung idealer Gase	54
7.2.1	Die Anwendbarkeit der Gasgesetze	54
7.2.2	Beschaffenheit und Verhalten von Gasmischungen	55

7.2.3	Das Gesetz von Dalton	55
7.2.4	Die spezifische Gaskonstante einer Gasmischung	56
7.2.5	Spezifisches Volumen und Dichte eines Gasgemisches	57
7.3	Ermittlung des Partialdruckes eines Gasgemisches	58
7.3.1	Partialdruck bei gegebenem Massenanteil und Gesamtdruck	58
7.3.2	Partialdruck bei gegebenem Raumanteil und Gesamtdruck	58

Wärmemenge 61 bis 74

Lektion 8

Wärmekapazität fester und flüssiger Stoffe 61

8.1	Die spezifische Wärmekapazität	61
8.1.1	Wahre und mittlere spezifische Wärmekapazität	62
8.2	Das Grundgesetz der Wärmelehre	63
8.2.1	Übertragung von Wärmeenergie in Stoffsystemen	64

Lektion 9

Kalorimetrie 66

9.1	Kalorimeter	66
9.2	Mischungsregel	67
9.2.1	Die Mischungstemperatur	67
9.2.2	Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität	68

Lektion 10

Wärmequellen 71

10.1	Natürliche Wärmequellen	71
10.2	Künstliche Wärmequellen	71
10.2.1	Reibungswärme	71
10.2.2	Elektrische Wärmequellen	71
10.2.3	Atomare Wärmequellen	71
10.2.4	Reaktionswärme	72
10.2.4.1	Brennwert und Heizwert	72

Änderung des Aggregatzustandes 75 bis 112

Lektion 11

Schmelzen und Erstarren 75

11.1	Das Schmelzen chemisch einheitlicher Stoffe	75
11.1.1	Die spezifische Schmelzwärme	76
11.2	Besonderheiten beim Schmelzen und Erstarren	76
11.2.1	Abhängigkeit des Schmelzpunktes vom Druck	76
11.2.2	Volumenänderung beim Schmelzen und Erstarren	77
11.2.3	Unterkühlung einer Schmelze	77
11.3	Das Schmelzen von Stoffgemischen	78
11.3.1	Schmelzen und Erstarren von Legierungen	78
11.3.2	Kältemischungen	79
11.3.2.1	Die Lösungswärme	79
11.3.2.2	Lösungsdiagramme	79

11.3.2.3	Eutektische Kältespeicher	80
11.3.2.4	Kältemischungen unter Verwendung von Eis	80

Lektion 12**Verdampfen und Kondensieren; Sublimieren** 83

12.1	Verdampfungstemperatur und Verdampfungsdruck	83
12.2	Kondensation	84
12.3	Besonderheiten beim Verdampfen und Kondensieren	85
12.3.1	Verdunstung	85
12.3.2	Siedepunkterhöhung von Lösungen	85
12.3.3	Unterkühlter Dampf	86
12.4	Verdampfungs- und Kondensationswärme	86
12.5	Enthalpiezunahme beim Schmelzen und Verdampfen	87
12.6	Die Phasen vom festen Körper zum Heißdampf	89
12.7	Die Zustandsdiagramme	91
12.7.1	Dampfdefinition und kritischer Zustand	91
12.7.2	Das Temperatur, Enthalpie-Diagramm nach Mollier	92
12.7.3	Das Druck-, Enthalpie-Diagramm nach Mollier	93
12.7.3.1	Sublimation	93
12.7.3.1.1	Die Sublimationslinie im p, ϑ -Diagramm	94
12.7.4	Das Druck-, Volumen-Diagramm nach Mollier	95

Lektion 13**Feuchte Luft** 99

13.1	Feuchte Luft als Gasgemisch	99
13.2	Zustandsgrößen der feuchten Luft	99
13.2.1	Wasserdampf-Teildruck	99
13.2.2	Der Sättigungsdruck des Wasserdampfes	100
13.2.3	Der Taupunkt	100
13.2.4	Wassergehalt der Luft	101
13.2.4.1	Die absolute Luftfeuchtigkeit	101
13.2.4.2	Die relative Luftfeuchtigkeit	101
13.2.4.3	Der Wassergehalt feuchter Luft	103
13.2.4.3.1	Partialdrücke als Funktion von Wassergehalt und Gesamtdruck	104
13.2.5	Messung der Luftfeuchtigkeit	104
13.2.5.1	Hygrometer	104
13.2.5.2	Die Taupunktmethode	105
13.2.5.3	Die Absorptionsmethode	105
13.2.5.4	Psychrometer	106
13.2.5.4.1	Verdunstungspsychrometer	106
13.2.5.4.2	Sekunden-Psychrometer	107
13.3	Enthalpie, Wassergehalt-Diagramm (h, x -Diagramm) feuchter Luft	108
13.3.1	Druckabhängigkeit der h, x -Diagramme	110
13.3.2	Darstellung einiger Zustandsgrößen im h, x -Diagramm	110
13.3.2.1	Erwärmung oder Abkühlung feuchter Luft bei veränderlichem φ	110
13.3.2.2	Erwärmung oder Abkühlung feuchter Luft bei $\varphi = \text{konstant}$	110

Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Arbeit und umgekehrt

113 bis 173

Lektion 14**Technische Möglichkeiten der Umwandlung von Wärme
in mechanische Arbeit** 113

14.1	Forderungen an die Energieumwandlung	113
------	--	-----

14.2	Technische Anlagen zur Energieumwandlung	113
14.2.1	Wärme­kraft­ma­schin­en	114
14.2.1.1	Kolben­ma­schin­en	114
14.2.1.1.1	Kolben­dampf­ma­schin­e	114
14.2.1.1.2	Kolben­brenn­kraft­ma­schin­en	114
14.2.1.2	Strömungs­ma­schin­en	116
14.2.1.2.1	Turbin­en	116
14.2.1.2.2	Das Strahltriebwerk	116

Lektion 15**Der erste Hauptsatz der Thermodynamik** 118

15.1	Äquivalenz von Wärmeenergie und mechanischer Arbeit	118
15.2	Darstellung der Volumenänderungsarbeit im p, V -Diagramm	119
15.3	Innere Energie und Enthalpie	122
15.3.1	Fall 1: Völlige Umwandlung der Wärmeenergie in mechanische Arbeit ..	123
15.3.2	Fall 2: Völlige Umwandlung der Wärmeenergie in innere Energie	123
15.3.3	Fall 3: Umwandlung der Wärmeenergie in mechanische Arbeit und innere Energie	123
15.4	Die spezifische Wärme von Gasen	124
15.4.1	Spezifische Gaskonstante R_B im Verhältnis von c_p und c_v	126
15.4.1.1	Die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten von gasförmigen Stoffen ..	127

Lektion 16**Thermodynamische Zustandsänderungen** 130

16.1	Reversible und irreversible Zustandsänderungen	130
16.2	Die Isobare	130
16.3	Die Isochore	133
16.4	Die Isotherme	134
16.5	Die Isentrope bzw. Adiabate	137
16.6	Die Polytrope	139
16.6.1	Zusammenhang zwischen Polytropenexponent und Zustandsänderung	139
16.6.2	Die Berechnung der polytropen Zustandsgrößen	140

Lektion 17**Die Kreisprozesse im p, V -Diagramm (Arbeitsdiagramm)
und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik** 142

17.1	Begriff des Kreisprozesses	142
17.2	Der Betrag der Nutzarbeit	143
17.3	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	144
17.4	Der thermische Wirkungsgrad	145
17.5	Die Kreisprozesse der Wärme­kraft­ma­schin­en	146
17.5.1	Idealprozesse und Realprozesse	146
17.5.1.1	Die Vergleichsprozesse der Verbrennungskraftmaschinen	147
17.5.1.1.1	Der Diesel-Prozess (Gleichdruckprozess)	147
17.5.1.1.2	Der Otto-Prozess (Gleichraumprozess)	149
17.5.1.1.3	Der Seiliger-Prozess	149
17.5.1.1.4	Der Joule-Prozess	150
17.5.1.1.5	Der Ackeret-Keller-Prozess (Ericsson-Prozess)	150
17.5.1.1.6	Der Stirling-Prozess	150
17.5.1.1.7	Der Carnot-Prozess	151
17.5.1.1.8	Die thermischen Wirkungsgrade der Brennkraftmaschinen im Vergleich ..	151
17.5.1.2	Die Vergleichsprozesse der Dampfkraftprozesse	153
17.5.1.2.1	Der Clausius-Rankine-Prozess	153

17.5.1.2.2	Die ORC-Prozesse	153
17.5.2	Die wirklichen Kraftmaschinenprozesse	154

Lektion 18**Die Kreisprozesse im T, s -Diagramm (Wärmediagramm)** 157

18.1	Die Entropie als weitere Zustandsgröße der Thermodynamik	157
18.1.1	Dissipation von Energie	157
18.1.2	Definition der Entropie	157
18.2	Das T, s -Diagramm (Wärmediagramm)	158
18.2.1	Die Zustandsänderungen im T, s -Diagramm	159
18.3	Die Entropie und ihr Zusammenhang mit dem 2. Hauptsatz	160
18.3.1	Die Entropiezunahme bei der Wärmeleitung	161
18.4	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen	162
18.4.1	Wärmetransport entgegen dem Temperaturgefälle	162
18.4.2	Der linkslaufende Carnot-Prozess	163
18.4.2.1	Die Leistungszahl des Kältemaschinenprozesses	164
18.4.2.2	Die Leistungszahl des Wärmepumpenprozesses	165
18.4.3	Der ideale Kältemaschinenprozess bzw. Wärmepumpenprozess	165
18.4.3.1	Gegenüberstellung von rechts- und linkslaufendem Clausius-Rankine-Prozess	166
18.4.3.1.1	Die Drosselung	168
18.4.3.1.2	Möglichkeiten der Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades bzw. der Leistungszahl	170
18.4.3.1.3	Exergie und Anergie der Wärme	170

Beziehungen der Wärmeenergie zur elektrischen Energie 174 bis 178**Lektion 19****Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie** 174

19.1	Der Seebeck-Effekt	174
19.2	Die großtechnische Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie	174

Lektion 20**Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie** 175

20.1	Natürlich und technisch erzeugte Wärmeenergien	175
20.2	Der Peltier-Effekt	175
20.3	Der elektrische Heizleiter	176
20.3.1	Elektrische Arbeit und elektrische Leistung	176
20.3.2	Das elektrische Wärmeäquivalent	176
20.3.3	Der Wirkungsgrad der elektrischen Heizung	177

Wärmeübertragung 179 bis 217**Lektion 21****Möglichkeiten einer Wärmeübertragung** 179**Lektion 22****Wärmeleitung** 180

22.1	Technische Regeln für die Berechnung der Wärmeübertragung	180
------	---	-----

22.2	Der stationäre Wärmestrom	181
22.2.1	Wärmeleitung durch eine ebene Wand	181
22.2.2	Das Ohm'sche Gesetz der Wärmeleitung	184
22.2.3	Die Wärmestromdichte	185
22.2.4	Wärmeleitung durch eine mehrschichtige ebene Wand	185
22.2.5	Wärmeleitung durch gekrümmte Wände	187
22.2.5.1	Der Temperaturverlauf	187
22.2.5.2	Wärmeleitung durch zylindrische Wände	188
22.2.5.2.1	Einschichtige zylindrische Wand	188
22.2.5.2.2	Mehrschichtige zylindrische Wand	188

Lektion 23**Wärmeübergang** 190

23.1	Das Newton'sche Gesetz des Wärmeüberganges	190
23.1.1	Der Wärmeübergangswiderstand	191
23.2	Die Wärmeübergangszahl	192
23.2.1	Einflussgrößen des Wärmeüberganges	192
23.2.2	Bestimmung der Wärmeübergangszahl	193
23.2.2.1	Verwendung von angenäherten Erfahrungswerten von α	193
23.2.2.2	Ermittlung des α -Wertes im Versuch	194
23.2.2.3	Berechnung des α -Wertes	194

Lektion 24**Wärmedurchgang** 198

24.1	Wärmedurchgang durch ebene Wände	198
24.1.1	Definition des Wärmedurchganges	198
24.1.2	Die Wärmedurchgangszahl und der Wärmedurchgangswiderstand	198
24.1.2.1	Der Wärmedurchgangswiderstand	199
24.1.2.2	Verfahren zur Berechnung des Temperaturverlaufes in Wänden	200
24.2	Wärmedurchgang durch gekrümmte Wände	202

Lektion 25**Wärmestrahlung** 205

25.1	Mechanismus der Wärmeübertragung durch Strahlung	205
25.2	Emissions- und Absorptionsvermögen	206
25.2.1	Das Kirchhoff'sche Gesetz der Wärmestrahlung	206
25.2.2	Das Prevost'sche Gesetz der Wärmestrahlung	207
25.3	Das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz der Wärmestrahlung	207
25.4	Wärmeübertragung durch Strahlung	208
25.4.1	Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion	210
25.4.2	Gasstrahlung	211

Lektion 26**Wärmeaustauscher** 213

26.1	Bauformen der Wärmeaustauscher	213
26.1.1	Rekuperatoren	213
26.1.2	Regeneratoren	213
26.1.3	Mischwärmeaustauscher	214
26.2	Berechnung der Wärmeübertragung in Rekuperatoren	214
26.2.1	Gleichstrom und Gegenstrom	214
26.2.1.1	Die mittlere Temperaturdifferenz bei Gleichstrom und Gegenstrom	215

Lösungsgänge zu den Übungsaufgaben 218 bis 244

Ergebnisse der Vertiefungsaufgaben 245 bis 256

Sachwortverzeichnis 257 bis 262

Griechisches Alphabet 263

**DIN-Normen, Auswahl zu den Sachgebieten
dieses Buches** 263

Wärmezustand

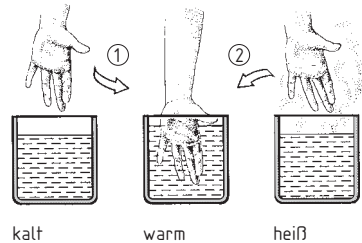
Lektion 1

Temperatur und Temperaturmessung

1.1 Die Temperatur in der menschlichen Empfindung

Beinahe jeder Mensch ist der Meinung, zu wissen, was man unter der Temperatur versteht. Gleichwohl ist es so, dass eine exakte wissenschaftliche Definition auf nicht geringe Schwierigkeiten stößt. Zunächst gilt, dass man unter der Temperatur ein Maß für das subjektive Empfinden von „**Wärme**“ und „**Kälte**“ versteht. Wie unterschiedlich dieses subjektive Empfinden sein kann, zeigt der in Bild 1 dargestellte Versuch: Man wird das warme Wasser als relativ heiß **1**

empfinden, wenn man vorher die Hand in das kalte Wasser hielt (①), und umgekehrt empfindet man das warme Wasser als relativ kalt, wenn man vorher die Hand in das heiße Wasser eingetaucht hatte (②).



Das Temperaturempfinden des Menschen ist subjektiv und deswegen zur exakten Temperaturermittlung ungeeignet.

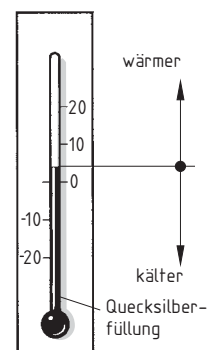
Es wird noch darauf verwiesen, dass das Temperaturempfinden durch spezielle Nervenendpunkte in der menschlichen Haut wahrgenommen wird. Diese werden als **Kältepunkte** bzw. **Krause'sche Endkolben** und als **Wärmepunkte** bzw. **Ruffini'sche Spindeln** bezeichnet. Mit Hilfe des Nervensystems nimmt der Mensch **Temperaturdifferenzen** wahr.

1.2 Die Temperatur als Zustandsgröße

Objektive Angaben über die Temperatur eines Körpers erhält man mit Hilfe der durch eine **Temperaturänderung** eintretenden **Zustandsänderung** eines Körpers, d. h. der Änderung einer **Zustandsgröße** bzw. Eigenschaft.

Unter einer **Zustandsgröße** versteht man **messbare Größen**, die den Zustand eines Systems charakterisieren.

Solche Zustandsgrößen sind z. B. **Druck** und **Volumen** eines Körpers. Bild 2 zeigt z. B. die Volumenänderung des Quecksilbers in einem **Thermometer**, und zwar in Abhängigkeit von der Temperatur. Durch die Änderung des Volumenzustandes wird also die **Temperatur messbar**. Somit gilt:



Die Temperatur ist eine Zustandsgröße.

2

Alle **Temperaturmessverfahren** beruhen auf der Änderung von Zustandsgrößen. Deshalb sollen zunächst die wichtigsten Aussagen über **physikalische Größen** mit ihren zugehörigen **Einheiten** gemacht werden, soweit sie für die Wärmelehre von Bedeutung sind:

1.3 Die Einheit der Temperatur im internationalen Einheitensystem

1.3.1 Basisgrößen und abgeleitete Größen

Mit dem Gesetz über die Einheiten im Messwesen, kurz: **Einheitengesetz**, hat sich die Bundesrepublik Deutschland dem **internationalen Einheitensystem** angeschlossen. Man unterscheidet in diesem System die **Basisgrößen** von den **abgeleiteten Größen**. Die nebenstehende Tabelle enthält die Basisgrößen mit den zugehörigen **Basiseinheiten (SI-Einheiten)** und den **Einheitenkurzzeichen**.

Alle abgeleiteten Größen lassen sich auf insgesamt sieben Basisgrößen zurückführen.

Bei der Herleitung von abgeleiteten Größen werden die Einheiten entsprechend der physikalischen Definitionsgleichung mathematisch miteinander verknüpft:

Basisgröße	Basiseinheit	Kurzzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektrische Stromstärke	Ampere	A
Thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Lichtstärke	Candela	cd
Stoffmenge	Mol	mol

Definitionen siehe 1.3.3.3

1.3.2 Druck als Beispiel für eine abgeleitete Größe

Aus der **Fluidmechanik** ist bekannt:

Den Quotienten aus Kraft F und der Fläche A , auf welche die Kraft wirkt, heißt Druck.

Eine Erläuterung zu dieser Definition ergibt sich aus Bild 1. In diesem Bild ist

F = Reaktionskraft aus einem gepressten Fluid (Flüssigkeit oder Gas) in N (Newton)

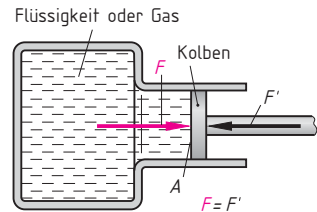
A = pressende (drückende) Kolbenfläche in m^2

Druck

$$p = \frac{F}{A} \quad \boxed{2-1} \quad \begin{array}{c|c|c} p & F & A \\ \hline \frac{N}{m^2} & N & m^2 \end{array}$$

In den Normen DIN 1314 „Druck“ und DIN 1301 „Einheiten“ ist festgelegt:

Die SI-Einheit für den Druck ist das Pascal. Einheitenkurzzeichen: Pa



1

$$\rightarrow 1 \text{ Pa} = 1 \frac{N}{m^2}$$

Diese Bezeichnung erfolgte zu Ehren des großen französischen Physikers und Mathematikers Blaise **Pascal (1623 bis 1662)**. Als dezimale Teile bzw. dezimale Vielfache sind z. B. gebräuchlich:

- 1 Mikropascal** = 1 μPa = 0,000001 Pa = 10^{-6} Pa
- 1 Hektopascal** = 1 hPa = 100 Pa = 10^2 Pa
- 1 Kilopascal** = 1 kPa = 1000 Pa = 10^3 Pa
- 1 Megapascal** = 1 MPa = 1 000 000 Pa = 10^6 Pa

Technische Rechnungen werden sehr oft in der Größenordnung von 10^5 Pa erforderlich. Dieser Druck entspricht etwa dem **atmosphärischen Druck**, dem uns umgebenden **Luftdruck**. 10^5 Pa haben das Einheitenzeichen **1 bar**. Diese Bezeichnung ist auf das griechische Wort „barys“ (schwer) zurückzuführen.

$$\rightarrow 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \frac{N}{m^2}$$

Die Umrechnung **alter Druckeinheiten** in Pascal ergibt sich aus der DIN 1314 „Druck“ und ist in der „**Mechanik der Flüssigkeiten und Gase**“, also der „**Fluidmechanik**“ erläutert.

M 1. Führen Sie mit Hilfe der folgenden Definitionen aus der **Dynamik** die Druckeinheit $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ auf Basiseinheiten zurück.

1. dynamisches Grundgesetz : Kraft = Masse · Beschleunigung $\longrightarrow F = m \cdot a$

2. Beschleunigung = $\frac{\text{Geschwindigkeitsunterschied}}{\text{Zeit}} \longrightarrow a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Lösung: Definitionsgleichung
$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot a}{A} = \frac{m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}}{A} = \frac{m \cdot \Delta v}{A \cdot \Delta t}$$

Einheitengleichung
$$[p] = \frac{[m] \cdot [\Delta v]}{[A] \cdot [\Delta t]} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

M 2. In der Anordnung des Bildes 1, Seite 2 wirkt eine Kraft $F' = 500 \text{ N}$ auf einen Kolben mit dem Durchmesser $d = 2 \text{ cm}$. Berechnen Sie den Druck p im Gefäß in Pa und in bar.

Lösung:
$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 500 \text{ N}}{\pi \cdot (0,02\text{m})^2} = 1591549,4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$p = 1591549,4 \text{ Pa} = 15,92 \text{ bar}$$

1.3.3. Die Temperaturskalen

1.3.3.1 Die Celsius-Skala

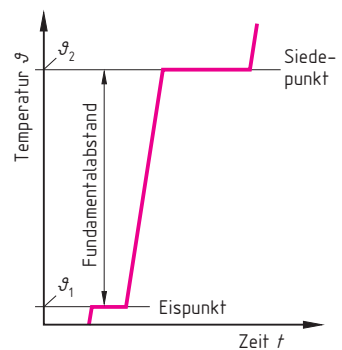
Bis etwa Anfang des 18. Jahrhunderts scheiterten genaue Temperaturangaben am Mangel geeigneter **thermometrischer Festpunkte**. Etwa zur gleichen Zeit erkannten der deutsche Glasbläser Gabriel Daniel **Fahrenheit (1686 bis 1738)**, der schwedische Astronom Anders **Celsius (1701 bis 1744)** und der französische Zoologe René **Réaumur (1683 bis 1757)** den großen Wert von **Eispunkt** und **Siedepunkt** des Wassers als thermometrische Festpunkte. Diese Fixpunkte nennt man auch **thermometrische Fundamentalpunkte**. Da in den Lektionen **Schmelzen** und **Verdampfen** (Lektionen 11. und 12.) sehr ausführlich auf diese Fundamentalpunkte eingegangen wird, soll an dieser Stelle nur die im Zusammenhang mit der Temperaturmessung wichtige Erkenntnis mitgeteilt werden:

Wasser schmilzt bzw. erstarrt (gefriert) und Wasser siedet (verdampft) bzw. kondensiert (verflüssigt) in Abhängigkeit vom vorhandenen Luftdruck bei einer bestimmten, d. h. festen Temperatur.

Da die Temperatur während dieser Zustandsänderungen weder steigt noch fällt, spricht man bei diesen typischen Temperaturen von den **Temperaturhaltepunkten**. Diese sind in Bild 1 dargestellt.

Vereinbarung:

Als **Formelzeichen für die Temperatur** wird in diesem Buch und nach DIN 1304 der kleine griechische Buchstabe ϑ , für die Zeit das kleine t verwendet.



1

Unter der Voraussetzung, dass sich der Luftdruck nicht ändert bzw. als momentan feste Größe angenommen wird, ergeben sich die beiden folgenden Temperaturhaltepunkte:

ϑ_1 = Eispunkt → Wasser schmilzt bei konstanter Temperatur.

ϑ_2 = Siedepunkt → Wasser siedet bei konstanter Temperatur.

Da der Luftdruck bekanntlich schwankt, blieb in der Festlegung der Fundamentalpunkte noch eine Unsicherheit. Deshalb vereinbarte man einen **Bezugsluftdruck**, der heute als normaler Luftdruck bzw. als **Normluftdruck** (Normdruck) bezeichnet wird.

Normluftdruck

$$p_n = 101325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 101325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$$

Unter dieser Voraussetzung werden aus den Temperaturhaltepunkten Eispunkt und Siedepunkt **thermometrische Fundamentalpunkte**.

Fundamentalpunkte sind überall rekonstruierbar und sind somit als **Messbezugsgröße** geeignet. Man nennt sie auch **Festpunkte** oder **Fixpunkte**.

Fahrenheit, Celsius und Réaumur verwendeten als Temperatureinheit das „Grad“. Inzwischen wird für das Wort Grad eine kleine hochgestellte Null verwendet, und es sind die folgenden Bezeichnungen üblich:

Grad Fahrenheit → °F
 Grad Celsius → °C
 Grad Réaumur → °R

Die wissenschaftlich gleich zu wertenden Leistungen von Fahrenheit, Celsius und Réaumur erhalten durch die folgende Festlegung für die praktische Anwendung einen unterschiedlichen Wert:

Wissenschaftler	Eispunkt bei p_n :	Siedepunkt von Wasser bei p_n :
Fahrenheit	32 °F	212 °F
Celsius	0 °C	100 °C
Réaumur	0 °R	80 °R

Der Unterschied des praktischen Wertes ist aus der Tabelle sofort zu ersehen:

Celsius wählte die Fundamentalpunkte so, dass diese hervorragend mit unserem **Dezimalsystem** in Einklang zu bringen sind. Die Bezeichnung °R hat deshalb nur noch eine historische Bedeutung, und die Bezeichnung °F für Temperaturangaben ist nur noch in einigen Ländern (England, USA) von Bedeutung.

Die Temperatureinheit °C ist eine international gültige Einheit, d. h. SI-Einheit.

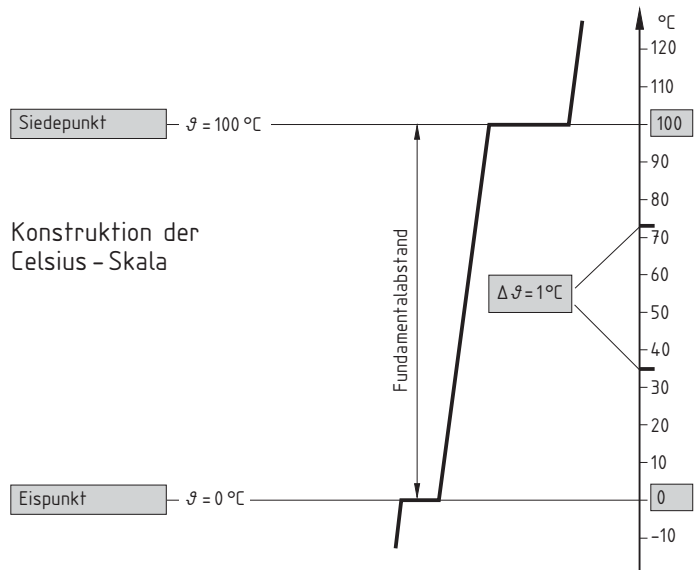
Benennt man mit $\vartheta^{\circ}\text{F}$, $\vartheta^{\circ}\text{C}$ und $\vartheta^{\circ}\text{R}$ die Gradzahlen, dann ergeben sich entsprechend der obigen Tabelle die folgenden Beziehungen:

$\vartheta^{\circ}\text{C} = (\vartheta^{\circ}\text{F} - 32) \cdot \frac{5}{9} = \vartheta^{\circ}\text{R} \cdot \frac{5}{4}$
$\vartheta^{\circ}\text{F} = 32 + \vartheta^{\circ}\text{C} \cdot \frac{9}{5} = 32 + \vartheta^{\circ}\text{R} \cdot \frac{9}{4}$
$\vartheta^{\circ}\text{R} = (\vartheta^{\circ}\text{F} - 32) \cdot \frac{4}{9} = \vartheta^{\circ}\text{C} \cdot \frac{4}{5}$

Anmerkung: Die Schreibweise nach DIN 1345 ist ϑ_C , ϑ_R und ϑ_F (siehe auch M 3. und M 4.).

Bild 1 zeigt, wie mit Hilfe der beiden Fundamentalpunkte eine Temperaturskala, die **Celsius-Skala** konstruiert werden kann: Der Fundamentalabstand zwischen $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird in 100 gleiche Teile aufgeteilt. Mit der gleichen Teilung wird sodann diese Skala über die Fundamentalpunkte hinaus verlängert.

1



Der hundertste Teil des Fundamentalabstandes zwischen Eispunkt und Siedepunkt von Wasser entspricht der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aus Bild 1 ist zu ersehen:

$\vartheta > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ \rightarrow positive Celsius-Temperaturen
 $\vartheta < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ \rightarrow negative Celsius-Temperaturen

M3. In den Berechnungsunterlagen einer in England erstellten Kälteanlage ist die Verdampfungstemperatur mit $\vartheta = 16\text{ }^{\circ}\text{F}$ angegeben. Wie groß ist diese Temperatur in $^{\circ}\text{C}$?

Lösung: $\vartheta_c = (\vartheta_F - 32) \cdot \frac{5}{9} = (16 - 32) \cdot \frac{5}{9}\text{ }^{\circ}\text{C} = -16 \cdot \frac{5}{9}\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\vartheta = -8,89\text{ }^{\circ}\text{C}$

M4. Bei Normalluftdruck $p_n = 1,01325\text{ bar}$ ist die Siedetemperatur von Wasser $\vartheta = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Überprüfen Sie rechnerisch den Tabellenwert für die Siedetemperatur von Wasser $\vartheta = 212\text{ }^{\circ}\text{F}$

Lösung: $\vartheta_F = 32 + \vartheta_c \cdot \frac{9}{5} = (32 + 100 \cdot \frac{9}{5})\text{ }^{\circ}\text{F} = (32 + 180)\text{ }^{\circ}\text{F}$

$\vartheta = 212\text{ }^{\circ}\text{F}$

1.3.3.2 Der absolute Nullpunkt und die Kelvin-Skala

Bild 1 fordert geradezu auf, darüber nachzudenken, wie weit es möglich ist, die Celsius-Skala nach oben und unten zu verlängern. Die Erkenntnisse der neueren Physik lassen darauf schließen, dass es eine **Maximaltemperatur**, d. h. eine größte Temperatur, gibt. Die folgende Angabe gilt als ziemlich gesichert:

Maximaltemperatur $\vartheta_{\max} = 5 \cdot 10^{12}$ Grad Celsius

Gegenüber dieser Temperatur erscheinen selbst die Oberflächentemperatur der Sonne mit ca. 6000 °C und die Kerntemperatur der Sonne mit ca. $15 \cdot 10^6$ °C als klein. Die Verlängerung der Celsius-Skala in den negativen Temperaturbereich führt zu einer **Minimaltemperatur**, d. h. einer kleinsten Temperatur. Die folgende Angabe ist theoretisch bewiesen und im Versuch annähernd nachvollzogen:

$$\text{Minimaltemperatur } \vartheta_{\min} = -273,15 \text{ °C}$$

Auf diese Minimaltemperatur wird noch näher in Lektion 2 eingegangen. Dort wird diese kleinste Temperatur, der **absolute Nullpunkt**, auch begründet.

Die Minimaltemperatur $\vartheta_{\min} = -273,15 \text{ °C}$ wird als absoluter Nullpunkt bezeichnet.

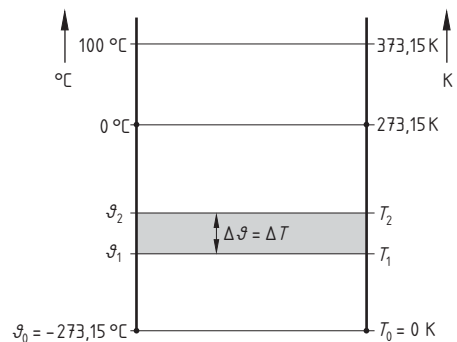
In der Thermodynamik wird die Temperatur in den meisten Fällen auf den absoluten Nullpunkt bezogen. Ist dies der Fall, dann bezeichnet man eine solche Temperaturangabe als die **absolute Temperatur** oder **thermodynamische Temperatur**. Zu Ehren des englischen Physikers **W. Thomson (1824 bis 1907)**, der später geadelt wurde und dann **Lord Kelvin** hieß, wird die absolute Temperatur in der Einheit Kelvin (Einheitenzeichen: K) angegeben und im Unterschied zur Celsius-Temperatur wird als Formelzeichen T verwendet.

Absolute Temperatur T in K

Bild 1 bringt die **Celsius-Skala** mit der **Kelvin-Skala** in Verbindung.

Absoluter Nullpunkt: $T_0 = 0 \text{ K}$
 $\vartheta_0 = -273,15 \text{ °C}$

Der absolute Nullpunkt wird auch als **absoluter thermodynamischer Fundamentalpunkt** bezeichnet. Aus Bild 1 ergibt sich der



1

Zusammenhang zwischen T und ϑ :

$T_K = \vartheta_C + 273,15$ in K 6-1

$\vartheta_C = T_K - 273,15$ in °C 6-2

Außerdem zeigt Bild 1:

Temperaturdifferenzen können in K oder in °C angegeben werden. ← **sehr wichtig!**

M5. Wasserdampf wird von $\vartheta_1 = 125 \text{ °C}$ auf $\vartheta_2 = 810 \text{ °C}$ überhitzt. Berechnen Sie

- a) T_1 und T_2
 b) $\Delta\vartheta$ und ΔT

Lösung: a) $T_1 = (\vartheta_1 + 273,15) \text{ K} = (125 + 273,15) \text{ K}$
 $T_1 = \mathbf{398,15 \text{ K}}$
 $T_2 = (\vartheta_2 + 273,15) \text{ K} = (810 + 273,15) \text{ K}$
 $T_2 = \mathbf{1083,15 \text{ K}}$

$$\begin{array}{l}
 \text{b) } \Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 810\text{ }^\circ\text{C} - 125\text{ }^\circ\text{C} \\
 \Delta \vartheta = \mathbf{685\text{ }^\circ\text{C}} \\
 \\
 \Delta T = T_2 - T_1 = 1083,15\text{ K} - 398,15\text{ K} \\
 \Delta T = \mathbf{685\text{ K}}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 \\ \Delta T = T_2 - T_1 \end{array}} \right\} \Delta \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C} \triangleq \Delta T \text{ in K}$$

M 6. Weitere **international vereinbarte thermodynamische Fundamentalpunkte** sind die Siedepunkte von Sauerstoff, Schwefel, Silber und Gold, jeweils bei $p_n = 1,01325\text{ bar}$. Für den Siedepunkt von Sauerstoff findet man in der Literatur den Wert $T = 90,188\text{ K}$. Wie groß ist diese Temperatur in $^\circ\text{C}$?

Lösung: $\vartheta = (T - 273,15)\text{ }^\circ\text{C} = (90,188 - 273,15)\text{ }^\circ\text{C}$
 $\vartheta = \mathbf{-182,962\text{ }^\circ\text{C}}$

M 7. In technischen Rechnungen wird für den absoluten Nullpunkt meist der Näherungswert $\vartheta_0 = -273\text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt. Wie groß ist der relative Fehler in %, wenn man sich auf **Raumtemperatur** $\vartheta = 20\text{ }^\circ\text{C}$ bezieht?

Lösung: $\Delta \vartheta_1 = 293,15\text{ }^\circ\text{C} \triangleq 100\%$
 $\Delta \vartheta_2 = 293\text{ }^\circ\text{C} \triangleq x\%$

$$x = \frac{100\%}{293,15\text{ }^\circ\text{C}} \cdot 293\text{ }^\circ\text{C} = 99,95\%$$

Der relative Fehler beträgt somit 0,05 %.

1.3.3.3 Definition der Temperatureinheit Kelvin

In der Tabelle auf Seite 2 sind die **Basisgrößen** mit den zugehörigen **SI-Basiseinheiten** angegeben. Um möglichst optimale Vergleichsmöglichkeiten zu haben, hat man ständig neue Möglichkeiten erdnen, mit denen die SI-Basiseinheiten durch „**Einheitennormale**“ definiert werden konnten.

Die Definitionen der Basiseinheiten (und der abgeleiteten Einheiten) sind durch das Einheitengesetz festgeschrieben.

Während man z. B. früher das **Meter** auf den Erdumfang bezog, wendet man heute den wesentlich genaueren Bezug auf die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum an. 1 Meter entspricht der Lichtstrecke in $1/299792458\text{ s}$. Die **Sekunde** (s) bezieht sich auf eine atomistische Zustandsänderung. In diesem Zusammenhang denke man auch einmal über die Genauigkeit von **Atomuhren** nach. Die wohl einfachste Definition ist die der Basiseinheit **Kilogramm**:

Ein Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps.

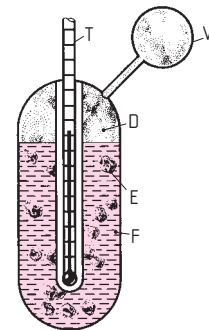
Dies ist ein zylindrischer Körper aus einer bestimmten Platin-Iridium-Legierung mit einem Durchmesser von 39 mm und einer Höhe von ebenfalls 39 mm. Er wird bei Paris aufbewahrt, und alle der **internationalen Meterkonvention** angeschlossenen Länder verfügen über eine Kopie dieses sog. **Urkilogramms**.

Im obigen Sinne hat man sich auch nicht damit zufrieden gegeben, den Eispunkt als Temperatur des bei Atmosphärendruck schmelzenden Eises oder Schnees zu akzeptieren. Die heute übliche Methode der Eispunktbestimmung führt zu einer erstaunlichen Genauigkeit:

Der untere Fundamentalpunkt des Fundamentalabstandes kann heute mit einer Genauigkeit von weniger als 1/10000 °C ermittelt werden.

Dazu ist es erforderlich, dass man zunächst Eis aus Wasser mit höchster chemischer Reinheit und unter völligem Ausschluss von Luft, die normalerweise in Wasser und Eis in gelöster Form vorkommt, herstellt. Dies geschieht im sog. **Tripelpunktgefäß** (Bild 1). Bei einem sehr kleinen Druck, der mit einer Vakuumpumpe V erzeugt wird, stellt sich bei einer bestimmten Temperatur T ein Gleichgewichtszustand ein, bei dem Wasser in den **Aggregatzuständen**

fest → Eis → E
 flüssig → Wasser → F
 gasförmig → Dampf → D

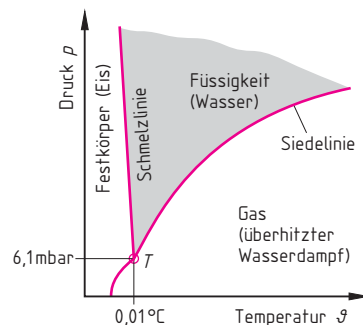


1

gleichzeitig im Gefäß vorhanden ist. Diesen äußerst genau herstellbaren Zustand nennt man den **Tripelpunkt** oder den **Dreiphasenpunkt** von Wasser. Den beschriebenen Sachverhalt, auf den in den Lektionen 11 und 12 noch sehr genau einzugehen ist, zeigt Bild 2 in einem **Druck, Temperatur-Diagramm**. Die Daten des Tripelpunktes lauten:

$p_t = 6,1 \text{ mbar}$ → **Tripelpunkt-Druck**

$\vartheta_t = 0,01 \text{ °C}$ → **Tripelpunkt-Temperatur**



2

Anmerkung: 6,1 mbar \triangleq 6,1 hPa (Hekto-Pascal)

Der Tripelpunkt wird auch als **genauer Eispunkt** bezeichnet und die Tripelpunkt-Temperatur ϑ_t ist der genaueste **thermodynamische Fundamentalpunkt**.

Tripelpunkt-Temperatur

$$\vartheta_t = 0,01 \text{ °C} \triangleq \text{absoluter Temperatur } T_t = 273,16 \text{ K}$$

Mit diesem Temperaturzustand ist es möglich, die **thermodynamische Temperatureinheit** Kelvin genau zu definieren:

1 Kelvin ist der 273,16te Teil der absoluten Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.

M 8. Der Tripelpunkt-Druck von Wasser beträgt $p_t = 6,1 \text{ mbar}$ (Millibar, d. h. tausendstel bar). Rechnen Sie diesen Druck um

- a) in bar,
- b) in Pa.

Lösung: a) $p_t = 6,1 \text{ mbar} = \frac{6,1}{1000} \text{ bar}$
 $p_t = \mathbf{0,0061 \text{ bar}}$

b) $p_t = 0,0061 \text{ bar} = 0,0061 \cdot 100000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 610 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
 $p_t = \mathbf{610 \text{ Pa}}$