

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 Größe	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	Gesetz 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 Gaskonstante aus der universellen Gaskonstante	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 Stoffsysteme	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	Siedepunktserhöhung 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_i 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	Natürliche und technisch erzeugte elektrische Energien	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 Ohmsche 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 Newtonsche 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 Kirchhoffsche Gesetz der Wärmestrahlung	206
25.2.2	Das Prevostsche Gesetz der Wärmestrahlung	207
25.3	Das Stefan-Boltzmannsche 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