

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Grundbegriffe | 1 |
| 1.1 | Thermodynamisches System | 1 |
| 1.2 | Zustand und Zustandsgrößen; Prozeß | 1 |
| 1.3 | Natürliche Vorgänge und Gleichgewicht; Temperatur | 3 |
| 1.4 | Nullter Hauptsatz | 5 |
| 1.5 | Temperaturfixpunkte und empirische Temperaturskala | 5 |
| 2 | Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltungsprinzip) | 7 |
| 2.1 | Arbeit am geschlossenen System | 7 |
| 2.2 | Innere Energie und Wärme | 10 |
| 2.2.1 | Diathermes, isoliertes und adiabates System | 10 |
| 2.2.2 | Innere Energie | 10 |
| 2.2.3 | Wärme | 11 |
| 2.3 | Erster Hauptsatz für ein geschlossenes System | 12 |
| 3 | Zustandsgleichungen und Zustandsänderungen | 14 |
| 3.1 | Zustandseigenschaften einfacher Körper | 14 |
| 3.2 | Thermische Zustandsgleichung idealer Gase | 15 |
| 3.2.1 | Versuch von Gay-Lussac (1816) | 15 |
| 3.2.2 | Boyle-Mariottesches Gesetz (1664–1676) | 16 |
| 3.2.3 | Zustandsgleichung idealer Gase | 16 |
| 3.2.4 | Abweichungen vom idealen Verhalten | 17 |
| 3.3 | Kalorische Zustandsgleichung idealer Gase | 19 |
| 3.4 | Nichtstatische und quasistatische Zustandsänderungen | 24 |
| 3.5 | Quasistatische Zustandsänderungen in ruhenden homogenen Systemen | 25 |
| 3.5.1 | Quasistatische Zustandsänderungen bei konstantem Volumen (Isochore) | 25 |
| 3.5.2 | Quasistatische Zustandsänderungen bei konstantem Druck (Isobare) | 26 |
| 3.5.3 | Quasistatische Zustandsänderungen bei $pV = \text{konst}$ | 27 |
| 3.5.4 | Quasistatische Zustandsänderungen mit $\partial q + \partial w_R = 0$ (Isentrope) | 28 |
| 3.5.5 | Polytrope Zustandsänderung | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 4 Kreisprozesse | 32 |
| 4.1 Kreisprozesse in geschlossenen Systemen | 32 |
| 4.1.1 Rechtslaufender Carnotscher Kreisprozeß mit id. Gas konst. spez. Wärmekapazität | 33 |
| 4.2.1 Linkslaufender Carnotscher Kreisprozeß | 35 |
| 4.1.3 Umkehrung des Carnotschen Kreisprozesses | 36 |
| 5A Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik | 37 |
| 5.1 Umkehrbare und nichtumkehrbare Prozesse | 37 |
| 5.2 Statistische Deutung des adiabaten Druckausgleichs | 38 |
| 5.3 Statistische Energieverteilung | 41 |
| 5.4 Wahrscheinlichkeit und Entropie | 45 |
| 5.5 Temperatur | 46 |
| 5.6 Zweiter Hauptsatz für geschlossene Systeme | 48 |
| 5.7 Zusammenhang zwischen Wärmeaustausch und Entropieänderung | 49 |
| 5.8 Entropie, Enthalpie und innere Energie einfacher Stoffe | 51 |
| 5.8.1 Entropie idealer Gase | 51 |
| 5.8.2 Entropie beliebiger Stoffe, deren Zustand durch zwei unabhängige Zustandsgrößen eindeutig bestimmt ist | 52 |
| 5.8.3 Enthalpie und innere Energie beliebiger Stoffe, deren Zustand durch zwei unabhängige Zustandsgrößen eindeutig bestimmt ist | 54 |
| 5.9 T,s-Diagramm für einfache Stoffe | 56 |
| 5.9.1 Darstellung von Prozeßgrößen im T,s-Diagramm | 57 |
| 5B Offene Systeme | 60 |
| 5.10 Erster und zweiter Hauptsatz für ein offenes System | 60 |
| 5.10.1 Erster Hauptsatz | 60 |
| 5.10.2 Zweiter Hauptsatz | 61 |
| 5.11 Erster und zweiter Hauptsatz für einen stationären Fließprozeß | 61 |
| 5.11.1 Erster Hauptsatz | 62 |
| 5.11.2 Zweiter Hauptsatz | 62 |
| 5.11.3 Quasistatische Zustandsänderungen bei stationären Fließprozessen | 62 |
| 5.11.4 Kreisprozesse als Folge von stationären Fließprozessen | 66 |
| 5.12 Mollier h,s-Diagramm für einfache Stoffe | 68 |

| | |
|---|-----------|
| 5C Exergie | 70 |
| 5.13 Natürliche Vorgänge und Gleichgewicht | 70 |
| 5.14 Umwelt und Energieumwandlung | 71 |
| 5.15 Exergie und Anergie | 71 |
| 5.15.1 Stationäre Fließprozesse; Wärmeaustausch nach außen nur mit der Umgebung | 71 |
| 5.15.2 Stationärer Fließprozeß mit beliebigem Wärmeaustausch | 73 |
| 5.15.3 Exergie geschlossener Systeme (maximale Arbeit) | 77 |
| 6 Zustandsgleichungen realer Gase | 78 |
| 6.1 Zustandsgleichungen nach van der Waals (1873) | 78 |
| 6.2 Weitere Zustandsgleichungen | 81 |
| 6.2.1 Beattie-Bridgeman-Gleichung | 81 |
| 6.2.2 Benedict-Webb-Rubin-Gleichung | 81 |
| 6.2.3 Virialkoeffizienten | 82 |
| 6.2.4 Wasserdampfformeln | 82 |
| 6.3 Zweiphasengebiete | 83 |
| 6.3.1 Clapeyron-Clausius-Gleichung | 85 |
| 6.4 Verdampfung | 87 |
| 6.4.1 Der Verdampfungsvorgang | 87 |
| 6.4.2 Quasistatische Zustandsänderungen vom Naßdampf | 89 |
| 6.5 Mollier h,s-Diagramm für Wasserdampf | 90 |
| 6.6 Joule-Thomson-Effekt; Grundlagen der Gasverflüssigung | 91 |
| 6.6.1 Gasverflüssigungsverfahren nach Linde | 92 |
| 7 Gemische und Mischungsprozesse | 94 |
| 7.1 Gemische | 94 |
| 7.1.1 Gemische idealer Gase | 95 |
| 7.2 Adiabate Mischung idealer Gase (geschlossenes System) | 96 |
| 7.3 Stadionärer und adiabater Mischungsprozeß | 100 |
| 7.4 Feuchte Luft | 101 |
| 7.4.1 Zustandsgrößen feuchter Luft | 101 |
| 7.4.2 Mollier h,x-Diagramm für feuchte Luft | 105 |
| 7.4.3 Stationäre und adiabate Mischungsvorgänge mit feuchter Luft | 106 |
| 7.4.4 Stationäre Mischung mit Wärmezufuhr | 108 |
| 7.4.5 Stationäre und adiabate Zumischung von reinem Wasser bzw. Wasserdampf | 108 |

| | | |
|-----------------------------|--|------------|
| 8 | Verbrennungsvorgänge und andere chemische Umsetzungen | 110 |
| 8.1 | Stoffumsatz | 110 |
| 8.1.1 | Oxidationsverhältnis λ und Verbrennungsgasverhältnis χ | 111 |
| 8.2 | Energiebilanz | 113 |
| 8.2.1 | Adiabate Verbrennungstemperatur | 115 |
| 8.3 | Entropiebilanz und Irreversibilität der Verbrennung | 116 |
| 8.3.1 | Exergieverlust bei adiabater Verbrennung | 116 |
| 9 | Strömungs- und Arbeitsprozesse | 119 |
| 9.1 | Beliebige Expansion bzw. Kompression mit quasistatischer polytroper Zustandsänderung | 119 |
| 9.2 | Verzögerte und beschleunigte stationäre Strömungsvorgänge ohne Arbeitsleistung | 123 |
| 9.3 | Stationäre Strömung konstanten Querschnitts mit Wärmeaustausch | 125 |
| 9.4 | Adiabate Strömungsprozesse | 126 |
| 9.4.1 | Strömungsquerschnitte | 128 |
| 9.4.1.1 | Geschwindigkeit im Lavalzustand | 129 |
| 9.4.1.2 | Lavaldruck | 130 |
| 9.4.1.3 | Lavalquerschnitt und beliebiger Düsenquerschnitt | 131 |
| 9.4.2 | Der senkrechte Verdichtungsstoß | 132 |
| 9.4.3 | Schwacher Stoß; Schallgeschwindigkeit | 134 |
| 9.5 | Arbeitsprozesse mit adiabater Expansion oder Kompression | 135 |
| 9.6 | Isotherme Kompression (bzw. Expansion) | 139 |
| 10 | Energieumwandlung Wärme-Arbeit | 142 |
| 10.1 | Thermodynamische Mitteltemperatur beim isobaren Wärmeaustausch (Mittlere Wärmezuführtemperatur bzw. Wärmeabführtemperatur) | 142 |
| 10.2 | Dampfkraftprozeß | 144 |
| 10.2.1 | Einfache Dampfkraftanlage | 144 |
| 10.2.2 | Zwischenüberhitzung | 147 |
| 10.2.3 | Speisewasservorwärmung | 147 |
| 10.3 | Gasturbinenprozesse | 149 |
| 10.3.1 | Geschlossener Gasturbinenprozeß | 149 |
| 10.3.2 | Geschlossener Gasturbinenprozeß im Wärmeaustausch | 150 |
| 10.3.3 | Einfacher offener Gasturbinenprozeß | 151 |
| 10.3.4 | Prinzip des Strahltriebwerkes | 153 |
| Literaturverzeichnis | | 155 |
| Sachwortverzeichnis | | 156 |