

# Thermodynamische Grundlagen für stationäre Prozesse – Reversible Zustandsänderungen des idealen Gases –

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, März 2013

## I. Hauptsätze der Thermodynamik

Der **1. Hauptsatz der Thermodynamik** formuliert in spezieller Weise den Energieerhaltungssatz:

In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller Energien konstant. (R. Mayer und J. P. Joule 1842, H. v. Helmholtz 1847)

### 1. Hauptsatz für stoffdichte Systeme

Die Zufuhr an Wärme  $q$ , dissipativer Energie  $w_R$  und Volumenänderungsarbeit  $w_v$  bewirkt eine entsprechende Erhöhung der inneren Energie  $u$ , sodass der Energieerhaltungssatz bei einer Zustandsänderung vom Zustand 1 in den Zustand 2 erfüllt ist:

$$q_{12} + w_{v,12} + w_{R,12} = u_2 - u_1 \quad (1)$$

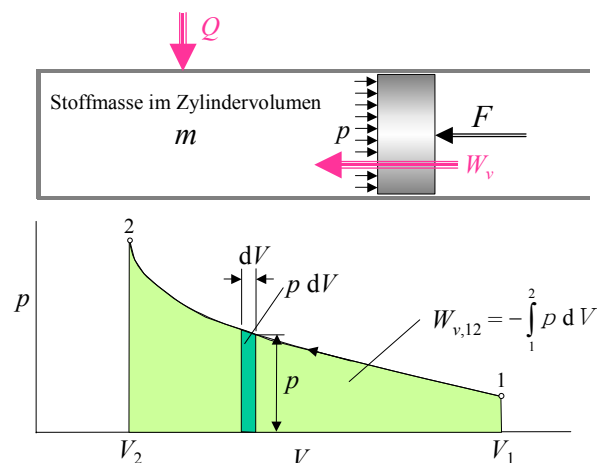
Die Darstellung bezieht sich auf die spezifischen Größen, d. h., sie gelten pro kg Stoff. Zum Beispiel  $q_{12} = Q_{12} / m$  usw.

Die innere Energie  $u$  ist eine kalorische Zustandsgröße, die den "Energievorrat" des thermodynamischen Systems kennzeichnet.

Für die gesamte Volumenänderungsarbeit gilt:

$$W_{v,12} = - \int_1^2 p \, dV .$$

Im nebenstehenden Bild sind die Zusammenhänge für einen Zylinder mit reibungsfrei beweglichen Kolben, auf den die Kraft  $F$  wirkt, veranschaulicht. Das Integral ist  $< 0$  und somit die Volumenänderungsarbeit  $W_{v,12} > 0$ , d. h., die Arbeit ist dem System zuzuführen.



Die Division durch die Stoffmasse  $m$  ergibt die spezifische Volumenänderungsarbeit.

$$w_{v,12} = - \int_1^2 p \, dv . \quad (2)$$

Gl. (1) kann in differentieller Form geschrieben werden:

$$dq + dw_v + dw_R = du \quad (3)$$

bzw.

$$dq - p \, dv + dw_R = du . \quad (3a)$$

Diese Zustandsänderungen sind bei Kolbenmaschinen im Zeitraum geschlossener Ein- und Austrittsventile technisch sehr bedeutungsvoll.

*Hinweis:*

Erfolgt die Zustandsänderung reversibel, dann ist  $dw_R = 0$ . Die Irreversibilität wirkt immer wie eine Wärmezufuhr während der Zustandsänderung, d. h., für die Reibungsarbeit gilt stets  $dw_R > 0$ .

### 1. Hauptsatz für offene Systeme mit stationärem Durchfluss

Bei Energieumwandlungsmaschinen mit einem kontinuierlichen, stationärem Stoffdurchsatz ist es zweckmäßig die Gl. (1) so umzuformen, dass eine rationelle Nutzung für diesen Anwendungsfall möglich wird. Eine symbolische Darstellung zeigt das nebenstehende Bild. Da es sich am Stoffeintritt und -austritt um unterschiedliche Zustandsgrößen handelt, sind die spezifischen Energien  $e_1$  und  $e_2$  zu berücksichtigen. Sie setzen sich jeweils aus der inneren Energie, der kinetischen Energie ( $w$  Geschwindigkeit des Stoffstromes) und der potenziellen Energie ( $z$  Höhenlage des Stoffstromes) zusammen. Es gelten:

$$e_1 = u_1 + \frac{c_1^2}{2} + g z_1; \quad e_2 = u_2 + \frac{c_2^2}{2} + g z_2. \quad (4)$$

Der Zusammenhang zwischen den Energieströmen und den spezifischen Energien ist gegeben durch  $\dot{E}_1 = \dot{m} e_1$ ;  $\dot{Q} = \dot{m} q$  usw.

Eine besondere Ableitung ist für die am System vollzogene Leistung (Arbeit / Zeit) erforderlich. Während der Zeit  $\Delta \tau$  wird die sogenannte technische Arbeit (auch Wellenarbeit genannt)  $\dot{W}_t \Delta \tau$  dem System zugeführt und gleichzeitig tritt auch Volumenänderungsarbeit auf. So wird am Eintritt durch das Einschieben des Volumenelementes  $\Delta V_1$  die Volumenänderungsarbeit  $p_1 \Delta V_1$  dem System zugeführt und am Austritt entsprechend die Volumenänderungsarbeit  $p_2 \Delta V_2$  abgeführt. Im betrachteten stationären Fall gelten  $\Delta V_1 = v_1 \dot{m} \Delta \tau$  und  $\Delta V_2 = v_2 \dot{m} \Delta \tau$ . Damit kann die Gesamtleistung  $P$  benannt werden, wobei die Reibungsarbeit in  $\dot{W}_t$  eingeschlossen ist:

$$P = \dot{W}_t + p_1 v_1 \dot{m} - p_2 v_2 \dot{m}. \quad (5)$$

Die Energiebilanz mit den spezifischen Größen analog Gl. (1) lautet somit:

$$q_{12} + w_{i,12} + p_1 v_1 - p_2 v_2 = e_2 - e_1$$

bzw.

$$q_{12} + w_{i,12} = (u_2 + p_2 v_2) + \frac{c_2^2}{2} + g z_2 - (u_1 + p_1 v_1) - \frac{c_1^2}{2} - g z_1. \quad (6)$$

Als Abkürzung wurde in der Thermodynamik die Zustandsgröße *spezifische Enthalpie*

$$h = u + p v \quad (7)$$

eingeführt, wodurch sich Gl. (6) vereinfacht:

$$q_{12} + w_{i,12} = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1). \quad (8)$$

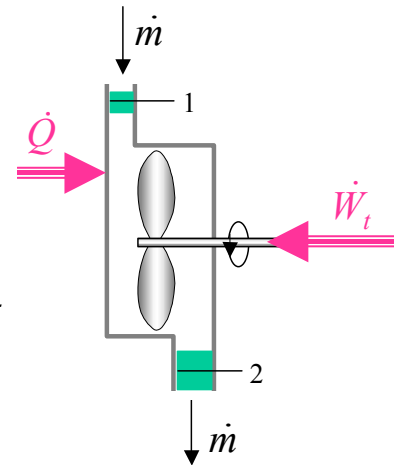
Diese Gleichung lautet in differentieller Form:

$$dq + dw_t = dh + c dc + g dz. \quad (9)$$

Sind die Änderungen der kinetischen und der potenziellen Energie vernachlässigbar, dann gilt:

$$dq + dw_t = dh. \quad (9a)$$

Man ist bestrebt die technische Arbeit in Analogie zur Volumenänderungsarbeit zu veranschaulichen. Aus diesem Grund werden die Gln. (1) und (6) gegenübergestellt, wobei im letzten Fall die Änderungen der kinetischen und potenziellen Energie vernachlässigt werden:



$$q_{12} + w_{v,12} + w_{R,12} = u_2 - u_1$$

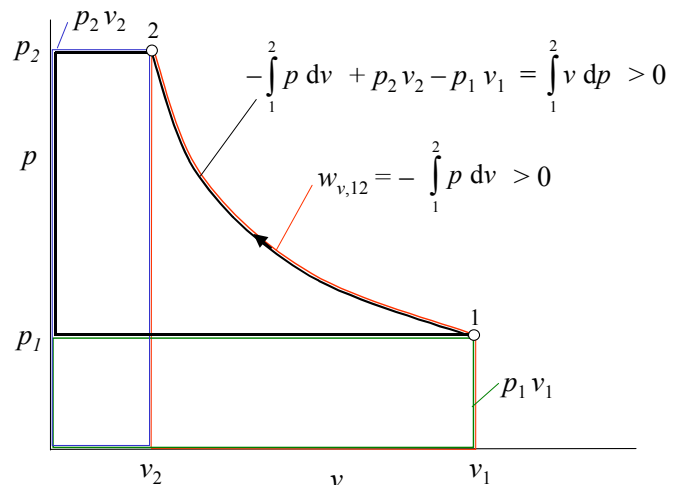
$$q_{12} + w_{t,12} = u_2 + p_2 v_2 - u_1 - p_1 v_1.$$

Die Substitution liefert

$$w_{v,12} + w_{R,12} = w_{t,12} - p_2 v_2 + p_1 v_1, \text{ womit nach Einsetzen von Gl. (2)}$$

$$w_{t,12} = - \int_1^2 p \, dv + p_2 v_2 - p_1 v_1 + w_{R,12} = \int_1^2 v \, dp + w_{R,12} \quad (10)$$

folgt, was der Flächenvergleich in der nebenstehenden Skizze beweist.



Die vergleichende Ableitung kann auch ausgehend von den Gln. (3a) und (9a) erfolgen:

$$dq + dw_R - p \, dv = du \quad \text{und} \quad dq + dw_t = dh \quad \text{liefert} \quad du + p \, dv - dw_R = dh - dw_t;$$

$$\text{mit } dh = du + d(pv) \quad \text{folgt} \quad p \, dv - dw_R = d(pv) - dw_t = p \, dv + v \, dp - dw_t \quad \text{und schließlich}$$

$$dw_t = v \, dp + dw_R \quad \text{bzw.}$$

$$w_{t,12} = \int_1^2 v \, dp + w_{R,12}. \quad (10a)$$

Werden die Änderungen der kinetischen und der potenziellen Energie berücksichtigt, so gilt:

$$w_{t,12} = \int_1^2 v \, dp + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + w_{R,12}. \quad (10b)$$

Der **2. Hauptsatz der Thermodynamik** trifft eine Aussage über die Ablaufrichtung natürlicher Prozesse. Während die Umwandlung von Arbeit in Wärme restlos vor sich gehen kann, ist der umgekehrte Vorgang – die Verwandlung von Wärme in Arbeit – nur begrenzt möglich.

*Formulierungen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik:*

- Wärme kann nie von selbst von einem kalten auf einen warmen Körper übergehen. (R.Clausius 1850)
- Es ist keine Kraftmaschine möglich, die einem Wärmebehälter Wärme entzieht und in Arbeit verwandelt, ohne dass mit den beteiligten Körpern noch weitere Veränderungen vor sich gehen. (W. Thomson 1851)
- Zur Gewinnung von Arbeit aus Wärme ist immer ein Temperaturunterschied erforderlich, und nur ein Teil der Wärme kann in Arbeit verwandelt werden.
- Aus *Anergie* (z. B. Umgebungsenthalpie) lässt sich nicht *Exergie* (technisch verwertbare Arbeit) gewinnen.

Eine mathematische Formulierung des 2. Hauptsatzes ist mit der Entropie möglich. Die *spezifische Entropie*  $s$  ist eine Zustandsgröße thermodynamischer Systeme. Die Änderung der Entropie in einem ablaufenden Prozess kennzeichnet die Irreversibilität und damit die Energieentwertung. Definition nach Clausius:

$$ds = \frac{du + p dv}{T} = \frac{dh - v dp}{T}. \quad (11)$$

Nach Gl. (3a) gilt für ein geschlossenes (stoffdichtes System)

$$ds = \frac{dq + dw_R}{T}. \quad (11a)$$

Der erste Summand ist bei Wärmezufuhr  $> 0$ , bei adiabaten Prozessen  $= 0$  und bei Wärmeabfuhr  $< 0$ . Der zweite Summand ist bei irreversiblen Prozessen  $> 0$ , bei reversiblen Prozessen  $= 0$ , niemals  $< 0$ !

Damit kann der 2. Hauptsatz auch folgendermaßen formuliert werden:

In einem abgeschlossenen System ohne Energieaustausch nach außen kann die Entropie nur zunehmen, im reversiblen Fall konstant bleiben.

In offenen Systemen ist der an die Stoffströme gebundene Entropietransport zu berücksichtigen.

## II. Reversible Zustandsänderungen

Die realen thermodynamischen Zustandsänderungen sind von zahlreichen Irreversibilitäten gekennzeichnet, die beispielsweise durch die Reibung innerhalb der Strömung, der Strömung an den Wänden usw. auftreten. Hinzu kommen instationäre Abläufe beispielsweise beim Füllen oder Entleeren der Arbeitsräume mit dem Arbeitsstoff durch das Öffnen und Schließen von Ventilen in endlichen Zeiträumen, durch die Steuerung von Verbrennungsvorgängen usw. Es ist deshalb sinnvoll z. B. die tatsächliche Verdichterarbeit der Arbeit einer *verlustfreien Zustandsänderung* gegenüberzustellen, um die realen Prozessverluste bewerten zu können.

Für die **reversible Zustandsänderung** vereinfachen sich die abgeleiteten Gleichungen zum 1. Hauptsatz. Es gelten:

- für stoffdichte Systeme

$$q_{12} + w_{v,12} = u_2 - u_1 = [c_v (T_2 - T_1)] \quad (12)$$

- für offene Systeme mit stationärem Durchfluss bei Vernachlässigung der Änderung der kinetischen und der potenziellen Energie

$$q_{12} + w_{t,12} = h_2 - h_1 = [c_p (T_2 - T_1)]. \quad (13)$$

**Sonderfall [ ]** gilt für den Arbeitsstoff **ideales Gas** mit konstanter spezifischer Wärmekapazität  $c_v$  bei konstantem Volumen bzw.  $c_p$  bei konstantem Druck.

Besonders anschaulich lassen sich im Geltungsbereich der Gln. (12) und (13) die *Volumenänderungsarbeit* und die *technische Arbeit* als Flächen im  $p,v$ -Schaubild und die *Wärme* im  $T,s$ -Schaubild darstellen, wie auf Seite 7 noch ausführlich gezeigt wird:

$$w_{v,12} = - \int_1^2 p dv \quad (14) \quad w_{t,12} = \int_1^2 v dp \quad (15) \quad q_{12} = \int_1^2 T ds. \quad (16)$$

Wird als Arbeitsstoff ideales Gas verwendet, stellt die allgemeine Gasgleichung den Zusammenhang zwischen  $p$ ,  $v$  und  $T$  her. Es gilt

$$p v = R T \quad (17)$$

mit der speziellen Gaskonstanten  $R = R_m / M$  und der allgemeinen (universellen) Gaskonstanten  $R_m = 8,31447 \text{ kJ}/(\text{kmol K})$  sowie  $M$  der Molmasse in  $\text{kg}/\text{kmol}$ .

Bezüglich der Entropieänderung folgen aus Gl. (11) nach entsprechender Substitution und Integration:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad \text{bzw.} \quad s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (18)$$

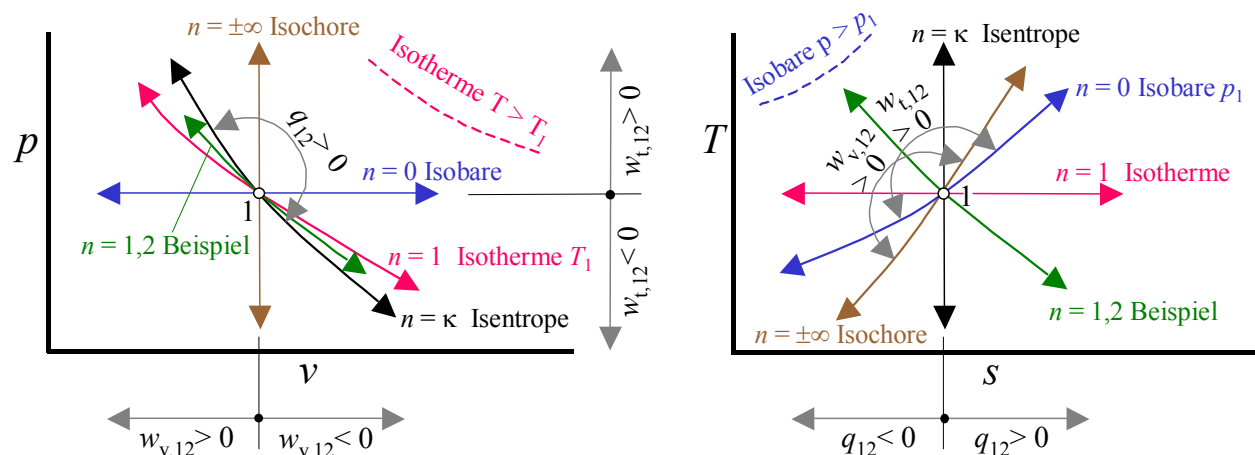
Die Zustandsgröße Entropie ist somit von der Temperatur und dem Volumen oder Druck abhängig. Als Bezugszustand wird meistens der Normzustand gewählt.

Als **technisch relevante, reversible Zustandsänderungen des idealen Gases mit konstanter Wärmekapazität** werden üblicherweise betrachtet:

Zustandsänderung	Merkmal	$p, v$ – Beziehung	Polytropenexponent
isobar	$p = \text{const}$	$p v^0 = \text{const}$	$n = 0$
isotherm	$T = \text{const}$	$p v^1 = \text{const}$	$n = 1$
isochor	$v = \text{const}$	$p v^\infty = \text{const}$ bzw. $p^{1/\infty} v = \text{const}$	$n = \pm\infty$
isentrop	$s = \text{const}$	$p v^\kappa = \text{const}$	$n = \kappa$ (Isentropenexponent)
polytrope		$p v^n = \text{const}$	$n$

Während die isobare, isotherme, isochore und isentrope Zustandsänderung aufgrund ihres jeweiligen Merkmals sofort verständlich ist, kann man die polytrope Zustandsänderung quasi als "Kunstprodukt" ansehen, mit dessen Hilfe man *alle* vorgenannten Änderungen formal einheitlich beschreiben kann. Die Bedeutung der polytropen Zustandsänderung ist aber umfassender, da mit dieser Darstellung durchaus technisch relevante Verläufe approximiert werden können. So beispielsweise Gasverdichtungen, die durch geringen Wärmeaustausch mit der Umgebung weder adiabat noch isotherm sind. Mit einem Polytropenexponenten  $n = 1 \dots \kappa$  kann in diesem Fall die Realität gut beschrieben werden.

Die Veranschaulichung der polytropen Zustandsänderung – ausgehend vom Anfangszustand 1 – im  $p, v$ - bzw.  $T, s$ -Schaubild zeigen die Möglichkeiten der Verallgemeinerung:



**Berechnungsgleichungen für reversible Zustandsänderungen eines idealen Gases mit konstanter Wärmekapazität:**

	Isobare	Isotherme	Isochore	Isentrope	Polytrope
$\frac{v_1}{v_2} =$	$\frac{T_1}{T_2}$	$\frac{p_2}{p_1}$	1	$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$	$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{n-1}}$
$\frac{p_1}{p_2} =$	1	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{T_1}{T_2}$	$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$	$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{n}{n-1}}$
$\frac{T_1}{T_2} =$	$\frac{v_1}{v_2}$	1	$\frac{p_1}{p_2}$	$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1}$	$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1}$
$q_{12} =$	$c_p (T_2 - T_1)$	$-R T \ln \frac{p_2}{p_1}$	$c_v (T_2 - T_1)$	0	$c_v \frac{n-\kappa}{n-1} (T_2 - T_1)$
$q_{12} =$	$-\frac{\kappa}{\kappa-1} w_{v,12}$	$-w_{v,12}$	$c_v (T_2 - T_1)$	0	$\frac{n-\kappa}{\kappa-1} w_{v,12}$
$w_{v,12} =$	$-p (v_2 - v_1)$	$-q_{12}$	0	$\frac{R}{\kappa-1} (T_2 - T_1) = c_v (T_2 - T_1)$	$\frac{R}{n-1} (T_2 - T_1)$
$w_{v,12} =$	$-R (T_2 - T_1)$	$R T \ln \frac{p_2}{p_1}$	0	$\frac{p_1 v_1}{\kappa-1} \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)$	$\frac{p_1 v_1}{n-1} \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$
$w_{t,12} =$	0	$w_{v,12}$	$v (p_2 - p_1)$	$\kappa w_{v,12} = c_p (T_2 - T_1)$	$n w_{v,12}$
$s_2 - s_1 =$	$c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$	$R \ln \frac{v_2}{v_1}$	$c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$	0	$c_v \frac{n-\kappa}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}$
$s_2 - s_1 =$	$c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$-R \ln \frac{p_2}{p_1}$	$c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	0	$c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$

- Alle *spezifischen* Zustands- oder Prozessgrößen sind *massebezogen*.
- Arbeit und Wärme sind vom Verlauf des Prozesses abhängig (*Prozessgrößen*). Sie stellen mögliche Formen des Energietransports über die Systemgrenzen dar.

Bei reversiblen Zustandsänderungen sind die Volumenänderungsarbeit, technische Arbeit und Wärme als einfache Integrale darstellbar, wie die Gln. (14) bis (16) verdeutlichen. Sie werden nachfolgend veranschaulicht.

$w_{v,12} = - \int_1^2 p \, dv$ Veranschaulichung im $p, v$ -Schaubild:				
Zusammenhang zwischen $w_{t,12}$ und $w_{v,12}$	$w_{t,12} = \pm \infty \cdot w_{v,12}$ $w_{t,12} = 0 \cdot w_{v,12}$	$w_{t,12} = w_{v,12}$	$w_{t,12} = \kappa w_{v,12}$	$w_{t,12} = n w_{v,12}$
$w_{t,12} = \int_1^2 v \, dp$ Veranschaulichung im $p, v$ -Schaubild:				
$q_{12} = \int_1^2 T \, ds$ Veranschaulichung im $T, s$ -Schaubild:				

### III. Vergleichsprozesse – Modellprozesse

Auf die technische Bedeutung der reversiblen Zustandsänderungen wurde bereits hingewiesen, um beispielsweise die Verluste der realen Vorgänge bewerten zu können. Selbstverständlich können auch mehrere hintereinander ablaufende Zustandsänderungen zusammengefasst und mit einem *Idealprozess* verglichen werden, z. B. wenn der optimale Druck zur Zwischenkühlung bei der mehrstufigen Gasverdichtung zu ermitteln ist.

Von besonderer Bedeutung sind thermodynamische Prozesse, die nach mehreren Einzelvorgängen wieder zum Prozessanfang gelangen. Es handelt sich hierbei um sogenannte *Kreisprozesse*. Auch diese realen Prozesse werden häufig durch eine Reihung reversibler Zustandsänderungen in den jeweils typischen Aggregaten nachgebildet. Man bezeichnet diese als *Vergleichsprozess* oder *Modellprozesse*.

Sie können auch zum Aufsuchen optimaler Betriebsparameter eingesetzt werden. So hängt der Wirkungsgrad einer Gasturbinenanlage maßgeblich von der Prozessführung und der maximalen Temperatur innerhalb des Kreisprozesses ab. Diese Einflüsse können mit Hilfe eines Vergleichsprozesses recht gut abgeschätzt und dem Aufwand technischer Veränderungen gegenübergestellt werden.



Bei Änderungen der Prozessführung ist man stets bestrebt, sich dem Carnotwirkungsgrad anzunähern. Man spricht dann auch von einer Carnotisierung des Kreisprozesses. Bei derartigen Untersuchungen und Effizienzabschätzungen sind die Modellprozesse sehr hilfreich.

Für typische Kreisprozesse wurden deshalb zugehörige Vergleichsprozesse entwickelt. Häufig sind diese nach ihrem Erfinder oder verdienstvollen Wissenschaftlern benannt, z. B.:

- Ackeret-Keller-Prozess und der Joule-Prozess zur Nachbildung von Gasturbinenanlagen
- Seiliger-Prozess zur Nachbildung von Verbrennungsmotoren (Diesel- und Ottomotoren).

Soweit es sich um einen gasförmigen Arbeitsstoff handelt, werden stets die einfachen Berechnungsgleichungen nach Seite 6 verwendet.

### IV. Rechenprogramm

Zur Nachrechnung einzelner oder hintereinander ablaufender reversibler Zustandsänderungen mit idealem Gas als Arbeitsstoff, die im Sonderfall auch Kreisprozesse bilden können, dient das kostenfrei downloadbare Rechenprogramm "Ideales\_Gas".

Ein Beispiel, das den Kreisprozess eines Verbrennungsmotors nachbildet, und eine umfangreiche Bedienanleitung sind beigefügt.

Auszug aus der Bedienanleitung:

**Zustandsänderung: Ideales Gas mit temperaturunabhängiger spezifischer Wärmekapazität**

Diagrammauswahl:  p-v  T-s

Temperatur - spezifische Entropie - Diagramm

Bedienanleitung:

1. Anlegen eines Pfades und Ordners für das zu berechnende Beispiel.
2. START drücken und in das neu geöffnete Fenster den gewählten Pfad und Ordner für das Beispiel eingeben. Die Datei wird automatisch angelegt.
3. Wird auf ein vorhandenes Beispiel zurückgegriffen, dann LADEN betätigen.
4. Eingaben zum Gas eintragen. Nur Zahlen und Komma verwenden (keine Leerzeichen). Beispielhaftes Vorgehen:
  - Eingabe eines Zustandspunktes durch Benennen von zwei Zustandsgrößen p und T oder p und v usw. Angabe von T und h reicht nicht aus!
  - Art der beabsichtigten Zustandsänderung angeben, z. B. 'T' für Isotherme. Bei Eingabe von 'n' (Polytrope) muss zusätzlich der Polytropenexponent n benannt werden.
  - Begrenzung der beabsichtigten Zustandsänderung benennen, z. B. p.
5. EINGABE prüfen/speichern aktivieren!
6. RECHNEN aktivieren!
7. Evtl. DRUCK aktivieren!
8. Um den Verlauf der Zustandsänderungen grafisch darzustellen, muss pv- oder Ts-Diagramm ausgewählt werden. EINGABE und danach ZEICHNEN drücken!
- Maßstab kann durch Überschreiben von xmin ... ymax und Teilungen geändert werden. EINGABE und ZEICHNEN erneut drücken!

Eingaben zur Charakterisierung des Gases:

28.960 kg/kmol M molare Masse  
1.400 kappa Isentropenexponent

Beispiele:

	M	kappa	cp
Ammoniak	17.03	1.29	2.18
Argon	39.95	1.67	0.52
Helium	4.00	1.67	5.20
Kohlendioxid	44.01	1.30	0.83
Luft, trocken	28.96	1.40	1.01
Sauerstoff	32.00	1.40	0.91
Stickstoff	28.01	1.40	1.04
Wasserstoff	2.02	1.41	14.05

Allgemeine Grundgrößen des Gases:

Allgemeine Gaskonstante:  $R_m = 8,31447 \text{ kJ/(kmol K)}$   
 Physikalischer Normzustand:  $p_n = 101325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$   
 $T_n = 273,15 \text{ K} = 0 \text{ °C}$

Berechnete Grundgrößen des Gases:

287.10 J/(kg K) R spez. Gaskonstante  
 1.292 kg/m³ rho\_n Dichte Normzustand  
 0.774 m³/kg v\_n spezifisches Volumen Normzustand  
 1.005 kJ/(kg K) cp spezifische  
 0.718 kJ/(kg K) cv Wärmekapazitäten  
 1.000 Dichteverhältnis rho\_n/rho\_n, Luft

Zustandspunkte i und Zustandsänderungen

i	p	T	v	h	s	AZA	n	v(i+1)-v(i)	h(i+1)-h(i)	s(i+1)-s(i)	q(i+1)	w_v(i+1)	w_u(i+1)
	bar	°C	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)			m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
1	1.000	20.00	0.8416	20.10	0.071								
2	18.380	400.34	0.1052	402.29	0.071	s		-0.74	382.19	0.00	272.99	382.19	
3	61.599	1726.85	0.0832	1735.24	0.818	n	10.00	-0.01	1332.9E	0.75	909.79	42.32	423.16
4	2.830	558.29	0.8416	558.99	0.818	s		0.75	-1176.2	0.00	0.00	-840.17	-1176.24
5	1.000	19.99	0.8416	20.08	0.071	v		0.00	-536.91	-0.75	-384.93	0.00	-153.97
6													
7													
8													
9													
10													
Summen:								-0.00	-0.01	-0.00	624.86	-524.86	-524.87

2 Zustandsgrößen angeben, Rest blank!  
 (T und h charakterisiert den Zustand nicht)  
 AZA Art der Zustandsänderung: Konstante Größe p, T, v, s oder h als Buchstabe eingeben. h=const bedeutet Drosselvorgang. Bei polytroper ZA n als Buchstabe und zusätzlich n als Zahl für den Polytropenexponenten eingeben.

Zustandspunkte löschen

START LADEN EINGABE prüfen/speichern RECHNEN ZEICHNEN DRUCK ENDE

Autor: Prof. Glück, 2013, Version 1