

# Grundlagen der Energietechnik:

Energie gehört zu den Grundbedürfnissen der Menschheit, sie tritt in den verschiedensten Erscheinungsformen auf: zur Nahrungszubereitung, zum Wohnen, zum Transport, zur Kommunikation, in der Technik, in der Industrie, in der Freizeit. Die Menschheit schöpft derzeit diesen Energiebedarf zum größten Teil aus den fossilen Energieträgern Kohle, Erdöl und Erdgas, welche einerseits begrenzt sind und andererseits als klimaschädlich bewertet werden. Die Erforschung und Anwendung alternativer Energiequellen wird zu einer entscheidenden Frage der künftigen Lebensweise.



kann auf umfassendes theoretisches und praktisches Wissen der Energietechnik im Allgemeinen und der Ökoenergietechnik im Besonderen zurückgreifen.

Um ihnen einen Überblick über die energietechnischen Grundlagen zu geben, haben wir eine Zusammenfassung der wichtigsten theoretischen Grundlagen erstellt.

Falls sie im Zuge ihres Immobilienprojektes eine fundierte Energieberatung benötigen oder auch ganz allgemein an Energiefragen interessiert sind – wir beraten sie auf höchstem Qualitätsniveau !

## Inhaltsverzeichnis

### 1 Allgemeines

- 1.1 *Energieformen und Umwandlungsmöglichkeiten*
- 1.2 *Probleme*
- 1.3 *Begriffe und Definitionen*

### 2 Grundlagen der Thermodynamik

- 2.1 *Thermische Zustandsgrößen*
- 2.2 *Kalorische Zustandsgrößen*
- 2.3 *Thermische Zustandsgleichung*
- 2.4 *Mol, Normvolumen*
- 2.5 *Thermische Ausdehnung*
- 2.6 *Thermodynamisches System*

### 3 Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

### 4 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

### 5 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

- 5.1 *Formulierung, Definition*
- 5.2 *Grenzen der thermischen Energieumwandlung*
- 5.3 *Beispiel*

### 6 Zusammenfassung

# 1 Allgemeines

Für das Verständnis der allgemeinen Energietechnik ist die Kenntnis der physikalischen und thermodynamischen Grundlagen sehr hilfreich. Die technische Thermodynamik kann als allgemeine Energielehre innerhalb der Physik und die chemische Thermodynamik als Energielehre innerhalb der Chemie betrachtet werden. Sie beschreibt die Verfahren der Energieumwandlung und Energieübertragung auf Basis von zwei fundamentalen Hauptsätzen.

Dieser Artikel behandelt die allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik und bildet quasi das Fundament für alle nachstehenden Energieanwendungen:

Biomassevergasung bakteriell, Biomassevergasung thermisch, Blockheiz-Kraftwerke BHKW, Brennstoffzellen, Energiespeicherung, Energieverteilung, Gasturbinen-Kraftwerke (speziell: Mikro-Gasturbine), Geothermie Stromerzeugung, Geothermie Wärme und Kälte, Kernkraftwerke, Kolbenmotoren (speziell: Stirling-Motor), Konventionelle Dampfkraftwerke, Kombinationskraftwerke, Kraft-Wärme-Kälte-Verbund, Kraft-Wärme-Kopplung, Photovoltaik, Solarthermie, Wasserkraftwerke, Windenergie, Wärmepumpen

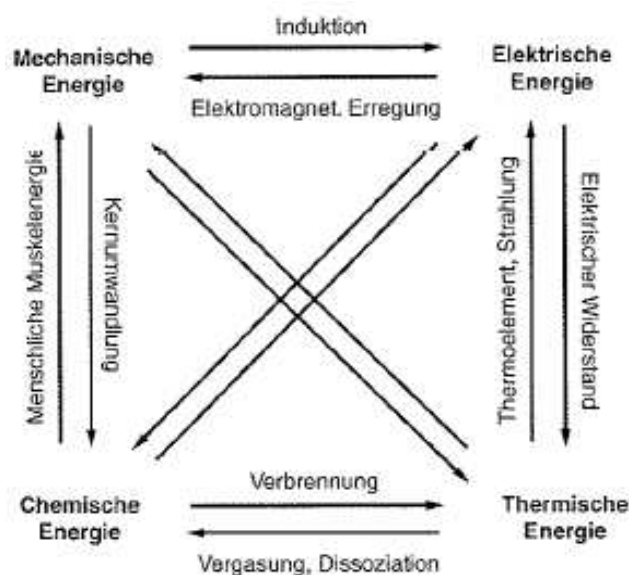


beschäftigt sich im Zuge der gebäudetechnischen Projektierung mit vielen Energieanwendungen und realisiert auch laufend entsprechende Projekte.

Wenn sie sich mit physikalischen Details nicht befassen wollen, am Schluss des Berichtes ist unsere Motivation für dieses Thema kurz zusammengefasst.

## 1.1 Energieformen und Umwandlungsmöglichkeiten

Die Energietechnik wandelt natürliche Energievorkommen in für den Menschen nutzbare Formen um. Die in vier Klassen einteilbaren Energieformen lassen sich alle umwandeln, wie nachstehende Grafik veranschaulicht



Quelle: Zahoransky, 2007

Die Umwandlung geschieht zwar ohne Energieverlust, meist entstehen jedoch unerwünschte, nicht mehr nutzbare Energieformen. Stark bemerkbar ist dies bei der Umformung von Kernenergie und chemischer Energie in elektrische Energie. So beträgt z.B. der Wirkungsgrad im Kernkraftwerk nur maximal 35% und

im Dampfkraftwerk maximal 44% [Zahoransky, 2007]. Im Dampfkraftwerk werden aus 100% eingesetzter im Brennstoff enthaltener chemischer Energie nur 44% elektrischer Energie umgewandelt, 56% müssen in Form von thermischer Energie mit nicht mehr nutzbarer niedriger Temperatur in die Umgebung abgeführt werden.

## 1.2 Probleme

- Das Reaktionsprodukt CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung von fossilen und biogenen Brennstoffen ist Hauptverursacher des Klimawandels. Biogene Energieträger aus einer nachhaltigen Forstwirtschaft werden als umweltneutral und damit als nicht klimarelevant eingestuft.
- Wir verbrauchen derzeit an einem Tag mehr fossile Brennstoffe, als die Erde in 1000 Jahren erzeugt hat.
- Elektrische Energie lässt sich großtechnisch nicht speichern. Sie muss zeitgleich zum Verbrauch erzeugt werden.

## 1.3 Begriffe und Definitionen

**Primärenergie:** Primärenergie ist der Energieinhalt von Energieträgern, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden.

z.B.: Rohöl, Erdgas, Kohle, Solarstrahlung

**Sekundärenergie:** Sekundärenergie ist der Energieinhalt von Energieträgern, die aus der Primärenergie durch einen oder mehrere Umwandlungsschritte gewonnen wurden

z.B.: Strom, Benzin, Wasserstoff

**Endenergie:** Endenergie umfasst nur die Verwendung derjenigen gehandelten Energieträger, die der Erzeugung von Nutzenergie dienen und somit endgültig als Energieträger dem Markt entzogen werden (=bezahlte Energieform)

**Nutzenergie:** Nutzenergie umfasst alle technischen Formen der Energie, welche der Verbraucher letztendlich benötigt, also Wärme, mechanische Energie, Licht, elektrische und magnetische Feldenergie und elektromagnetische Strahlung

**Primärenergierate:** Verhältnis von Nutzenergie zur eingesetzten Primärenergie.

Elektrischer Strom ist eine sehr hochwertige Energieform und wird mit sehr hohem Primärenergieeinsatz hergestellt.

## 2 Grundlagen der Thermodynamik

### 2.1 Thermische Zustandsgrößen

Die Eigenschaften eines Stoffes bzw. eines thermodynamischen Systems werden durch physikalische Größen beschrieben, den sogenannten Zustandsgrößen.

#### Volumen

Das Volumen V ist der Raum, den der Stoff mit der Masse m ausfüllt. Das spezifische Volumen v ist das auf die Masse bezogene Volumen.

Spezifisches Volumen	$v = \frac{V}{m} \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$	Dichte	$\rho = \frac{1}{V} = \frac{m}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
----------------------	---	--------	--

#### Druck

Als Druck p bezeichnet man die senkrecht auf eine Fläche A wirkende und darauf bezogene Normalkraft

Druck	$p = \frac{F_n}{A} \left[ \frac{N}{m^2} \right] = [Pa]$	Flüssigkeitssäule	$p = \rho \cdot g \cdot h \ [Pa]$
-------	---	-------------------	-----------------------------------

## Temperatur

Die Temperatur  $T$  eines Stoffes ist eine aus der Erfahrung bekannte physikalische Größenart, die sich nicht aus anderen Größen ableiten lässt. Die Temperatur wird in den Einheiten Kelvin, Grad Celsius und Grad Fahrenheit bezeichnet, wobei folgender Zusammenhang besteht:

$$[K] = [^{\circ}C] + 273,16 \quad [^{\circ}C] = [K] - 273,16 \quad [^{\circ}F] = 1,8 \cdot [^{\circ}C] + 32$$

## 2.2 Kalorische Zustandsgrößen

**Innere Energie**, **Enthalpie** und **Entropie** sind Funktionen anderer Zustandsgrößen und werden kalorische Zustandsgrößen genannt. Die Definition und Beschreibung erfolgt bei den Hauptsätzen der Thermodynamik.

## 2.3 Thermische Zustandsgleichung

Die Zustandsgrößen sind nicht voneinander unabhängig. Es kann immer nur eine beschränkte Anzahl von Zustandsgrößen frei gewählt werden, alle anderen sind damit festgelegt. Zwischen den thermischen Zustandsgrößen Volumen, Druck und Temperatur besteht bei allen homogenen Stoffen ein Zusammenhang, dessen mathematische Verknüpfung *thermische Zustandsgleichung* genannt wird.

allgemein

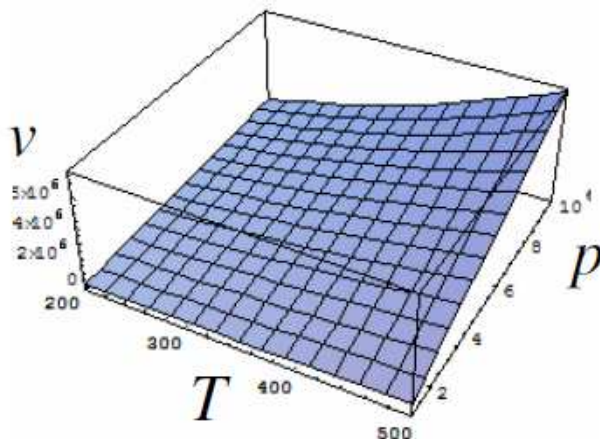
$$F(p, T, v) = 0$$

Ideales Gas allgemein

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

$$p \cdot v = R_i \cdot T$$

$$p \cdot \tilde{V} = \tilde{R} \cdot T$$



Grafische Darstellung der Zustandsgleichung

universelle Gaskonstante  $\tilde{R} = 8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$

spezifische Gaskonstante  $R_i = \frac{\tilde{R}}{M_i} = c_p - c_v \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$

$\tilde{R}$  bedeutet auf Molmenge bezogen

## 2.4 Mol, Normvolumen

Das Mol bzw. kmol wurde als Einheit eingeführt, um die Anzahl der Moleküle eines Stoffes, also die Stoffmenge, in anschaulicher Form darzustellen. Nach dem Gesetz von Avogadro ist bei allen idealen Gasen in gleichem Volumen bei gleichen Drücken und Temperaturen dieselbe Anzahl Moleküle enthalten. Das bedeutet, dass ein Kilomol eines jeden idealen Gases und der Molekülzahl  $6,022 \cdot 10^{26}$  bei gleichen physikalischen Bedingungen das gleiche Volumen, das molare Volumen  $V_m$ , einnimmt.

Stoffmenge (Molmenge)	$n = 1 \text{ Mol} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ Moleküle}$	Avogadro-Konstante
Molekülmasse	$M = \frac{\text{Atommasse}}{\text{kmol}}$	
Stoffmasse	$m = n \cdot M$	
Normvolumen	$V_{mn} = 22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$	
physikalischer Normzustand	$t_n = 0^\circ\text{C}$	$p_n = 101,325 \text{ kPa}$

**Beispiel:** Werte für 10 Mol Kohlendioxid  $\text{CO}_2$

Besteht aus 1 Molekül Kohlenstoff C und 2 Molekülen Sauerstoff O. C hat die Atommasse 12, O hat die Atommasse 16.

Molekülmasse  $M = \frac{\text{Atommasse}}{\text{kmol}} = \frac{12 + 2 \cdot 16}{\text{kmol}} = 44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

Stoffmasse  $m = n \cdot M = 0,01 \text{ kmol} \cdot \frac{44 \text{ kg}}{\text{kmol}} = 0,44 \text{ kg}$

Dichte  $\rho = \frac{M}{V_{mn}} = \frac{44 \text{ kg}}{\text{kmol}} \cdot \frac{\text{kmol}}{22,4 \text{ m}^3} = 1,96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Volumen  $V = \frac{m}{\rho} = 0,440 \text{ kg} \frac{\text{m}^3}{1,96 \text{ kg}} = 0,225 \text{ m}^3$

## 2.5 Thermische Ausdehnung

Unter konstantem Druck stehende Körper dehnen sich normalerweise mit steigender Temperatur sowohl in der Länge als auch im Volumen aus. Die Ausdehnungskoeffizienten sind genaugenommen temperaturabhängig (differenzielle Form), in der Praxis wird jedoch meist mit Mittelwerten  $1/T$  gerechnet.

thermischer Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha = \frac{1}{l} \cdot \left( \frac{\partial l}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{T}$

volumetrischer Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha = \frac{1}{V} \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{T}$

## 2.6 Thermodynamisches System

- Systeme und Systemgrenzen

Ein thermodynamisches System ist ein abgegrenzter Bereich, der von seiner Umgebung durch Systemgrenzen getrennt ist. Zwischen dem System und seiner Umgebung können Wechselwirkungen auftreten, indem Materie, Arbeit oder Wärme die Systemgrenze überschreiten.

Geschlossenes System: es tritt keine Materie über die Grenze, die Stoffmenge bleibt konstant

Offenes System: Materie tritt über die Grenze, es erfolgt ein Stoffstrom

Eine Systemgrenze ist adiabat, wenn kein Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt (dicht isoliert)

Homogenes System: einheitlicher Stoff oder Stoffgemisch

Heterogenes System: verschiedene Phasen eines Stoffes (z.B. Wasser und Wasserdampf)

- Zustandsgrößen und Prozessgrößen

Zustandsgrößen sind physikalische Größen, die den Zustand eines Systems beschreiben (Volumen, Druck, Temperatur, Innere Energie, Enthalpie ...)

Prozessgrößen treten an der Systemgrenze auf, sie sind vom Verlauf der Zustandsänderung abhängig (z.B. Wärme oder Arbeit)

- Zustandsänderungen und Prozesse

Prozesse bzw. Vorgänge verursachen Zustandsänderungen.

Ein Prozess ist reversibel oder umkehrbar, wenn der ursprüngliche Zustand wieder erreicht werden kann, ohne dass Änderungen in der Umgebung zurückbleiben.

Ein Prozess ist irreversibel oder nichtumkehrbar, wenn er nicht vollständig wieder rückgängig gemacht werden kann. Alle in der Natur ablaufenden Vorgänge sind irreversibel.

Ein stationärer Fließprozess liegt vor, wenn die Zustandsgrößen, die Stoffmengen und die Energieübertragung über die Systemgrenze zeitlich konstant bleiben.

### 3 Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

Der nullte Hauptsatz wird auch „Satz von der Existenz der Temperatur“ genannt. Er sagt aus, dass zwei Systeme die gleiche Temperatur besitzen, wenn sie sich im thermischen Gleichgewicht befinden, einem Beharrungszustand, in dem sich deren Zustand nicht ändert.

### 4 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz postuliert das Naturgesetz von der Erhaltung der Energie:

**„Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur in andere Formen umgewandelt werden“.**

$$\sum E = konst.$$

Wärme, Energie und Arbeit werden dabei als gleichwertig bezeichnet und können somit von einer Form in die andere Form umgewandelt werden, also mechanische Arbeit in Wärme und Wärme in mechanische Arbeit. Das Umwandlungsvermögen in beiden Richtungen ist jedoch nicht uneingeschränkt möglich, sondern unterliegt dem Carnot-Wirkungsgrad. Der erste Hauptsatz kann auch als Energiebilanz beschrieben werden:

**„Die Änderung der Energie eines Systems ist gleich der Summe der zu- oder abgeführten Energien“.**

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W + \Delta W'$$

$\Delta U$	Änderung der inneren Energie
$\Delta Q$	zu- bzw. abgeführte Wärmeenergie
$\Delta W$	zu- bzw. abgeführte mechanische Arbeit
$\Delta W'$	zu- bzw. abgeführte sonstige (z.B. elektrische) Arbeit

Die **innere Energie** ist das Ausmaß der Arbeit, die ein System verrichten kann, sie bildet quasi den Energievorrat des Systems. Sie ist eine Zustandsfunktion, eine Eigenschaft, die nur vom aktuellen Zustand des Systems abhängt. Abgeführte Energien werden mit negativem Vorzeichen eingesetzt. Diese Beziehung gilt für ein geschlossenes System mit fixen Grenzen.

Wird nun bei einem System mit verschiebbaren Grenzen eine Volumenänderungsarbeit geleistet, also die Systemgrenze verschoben, wird die innere Energie um diese Arbeit verringert und es kann die neue Zustandsgröße Enthalpie eingeführt werden:

$$H = U + p \cdot V$$

H ... Enthalpie,

U ... innere Energie

p.V ... Volumenänderungsarbeit

Die **Enthalpie** ist eine Zustandsfunktion, die Energieveränderungen bei konstantem Druck beschreibt. Betrachtet man nun ein offenes System mit stationärem Fließprozess unter Berücksichtigung von kinetischer und potenzieller Energie, erhält man die komplette Energiebilanz und somit komplette Formulierung des ersten Hauptsatzes:

$$Q_{12} + W_{12} = H_2 - H_1 + \frac{m}{2}(c_2^2 - c_1^2) + m \cdot g(z_2 - z_1)$$

Ein homogenes thermodynamisches System wird durch zwei Zustandsgrößen beschrieben. Die spezifische Enthalpie ist eine Funktion der Zustandsgrößen Druck p und Temperatur T. Zwei Variablen bedingen die Bildung des vollständigen Differenzials und man erhält daraus die allgemein gültige *kalorische Zustandsgleichung* für die Enthalpie:

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp$$

Der erste Differentialquotient wird **spezifische Wärmekapazität** genannt:

Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck:  $c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT$

Die spezifische Wärmekapazität ist also keine Konstante, sondern abhängig von der Temperatur. Vereinfacht und für die meisten Anwendungen mit ausreichender Genauigkeit wird mit dem Mittelwert gerechnet.

Aus der mittleren spezifischen Wärmekapazität lässt sich schließlich daraus die **Energiegleichung** für die Enthalpie ableiten:  $\Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T$

## 5 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

### 5.1 Formulierung, Definition

Der zweite Hauptsatz fasst die Erkenntnisse über die Ablaufrichtung natürlicher Prozesse (alle natürlichen Prozesse sind irreversibel) zusammen und kann in verschiedenen Formulierungen ausgedrückt werden:

**„Wärme kann nie von selbst von einem System niedriger Temperatur auf ein System höherer Temperatur übergehen“.**

**„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“**

**„Zur Gewinnung von Arbeit aus Wärme ist immer ein Temperaturunterschied erforderlich, und nur ein Teil der Wärme kann in Arbeit verwandelt werden“**

**„Aus Anergie lässt sich nicht Exergie gewinnen“**

## 5.2 Grenzen der thermischen Energieumwandlung

Carnot, ein französischer Physiker, hat einen reversiblen Kreisprozess entwickelt, der die Grenzen der thermischen Energieumwandlung anschaulich aufzeigt. Dieser Kreisprozess ist ein rein theoretischer Prozess und kann in der Praxis aus konstruktiven Gründen nicht erreicht werden, zeigt jedoch den theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit und somit elektrischen Strom. Der Prozess wird hier nicht näher erläutert (erfolgt in einem anderen Artikel), es ergibt sich jedenfalls folgender Zusammenhang:

$$\text{Thermischer Wirkungsgrad } \eta_{th} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{abgegebene technische Arbeit}}{\text{zugeführte Wärme}} = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

$T_0$  Temperatur, bei der die Wärme abgeführt wird (Umgebungstemperatur, z.B. 20 °C)

$T_1$  Temperatur, bei der die Wärme zugeführt wird (Prozesstemperatur, z.B. 500 °C in der Dampfturbine)

Gemäß erstem Hauptsatz der Thermodynamik bleibt bei der Umwandlung die gesamte Energie erhalten, es ändert sich jedoch die Wertigkeit der Energie, man unterscheidet zwischen zwei Energiearten. Bei der Umwandlung wird ein Teil der hochwertigen Exergie zu minderwertigen Anergie. Was man umgangssprachlich als *Energieverbrauch* bezeichnet, heißt thermodynamisch korrekt *Exergieverbrauch*. Die Umwandlung von Exergie in Anergie wird auch als *Dissipation* bezeichnet, es entstehen Dissipationsverluste oder ein Exergieverluststrom  $E_v = T_u \cdot S_{irr}$

Ein idealer Prozess wäre reversibel, es könnte also der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt werden. Natürliche Prozesse sind jedoch irreversibel, es entstehen Verluste durch Reibung, Verwirbelungen und Überströmungen, welche als Dissipationsenergie bezeichnet werden und durch die Zustandsgröße Entropie rechnerisch erfasst werden können. Die Entropie  $\Delta S$  wird wie folgt definiert:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} = \frac{dU + p \cdot dV}{T} = \frac{dH - V \cdot dp}{T} \quad \text{daraus folgt: } dQ = T \cdot dS$$

Es ist ersichtlich, dass in einem abgeschlossenen System ohne Energieaustausch nach außen auf Grund der Verlustenergie  $p \cdot dV$  die Entropie immer erhöht wird und niemals abnehmen kann. Das heißt, natürliche Prozesse laufen stets so ab, dass die Entropie zunimmt.

Die Energie wird praktisch bei jeder Anwendung in Richtung minderwertige Energie umgewandelt, sozusagen „entwertet“.

### Exergie:

Energie, die beliebig in andere Energieformen umwandelbar ist, also technisch verwertbar ist: „hochwertige Energie“

Beispiel: Elektroenergie, kinetische Energie, potentielle Energie

$$\text{Aus der Energiebilanz} \quad Q_{12} + W_{12} = H_2 - H_1 + \frac{m}{2}(c_2^2 - c_1^2) + m \cdot g(z_2 - z_1)$$

erhält man unter Berücksichtigung von  $dQ = T \cdot dS$ ,  $W_{12} = E$  und Umformung der Gleichung die

$$\text{Exergie im Stoffstrom} \quad E = H - H_u - T_u \cdot (S - S_u) + \frac{m}{2} \cdot c^2 + m \cdot g \cdot z$$

Mit Berücksichtigung der Energiegleichung  $\Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T$  und der Entropie  $\Delta S = c_p \cdot \ln\left(\frac{T}{T_u}\right)$

$$\text{ergibt sich:} \quad E = m \cdot c_p \left( T - T_u - T_u \cdot \ln\left(\frac{T}{T_u}\right) \right) + \frac{m}{2} \cdot c^2 + m \cdot g \cdot z$$



## Anergie:

Energie, die sich nicht in Exergie umwandeln lässt: „minderwertige Energie“

Beispiel: Wärme der Umgebungstemperatur

Anergie im Stoffstrom  $b_{St} = h_u + T_u \cdot (s - s_u)$

**Energie:** Exergie + Anergie = konstant

Das Verhältnis der in einem Prozess genutzten Exergie zur aufgewandten Exergie wird als exergetischer Wirkungsgrad bezeichnet

$$\text{exergetischer Wirkungsgrad } \zeta = \frac{(-w_t)_{irr}}{e_q} = \frac{E}{W_t} = \frac{E_{\text{Nutzen}}}{E_{\text{Aufwand}}} = \frac{\text{abgegebene Exergie} = \text{technische Arbeit}}{\text{aufgenommene Exergie}}$$

## 5.3 Beispiel

In einem Wasserspeicher werden 1000 l Wasser mit einer Elektroheizpatrone von 15 °C auf 100 °C erhitzt. Es wird angenommen, dass der Prozess adiabat (ohne Wärmeverlust nach außen) verläuft. Die kinetische und potentielle Energie wird vernachlässigt. Wie ist der exergetische Wirkungsgrad ?

$$\rho = 1000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad c_{pm} \Big|_{15^\circ\text{C}}^{100^\circ\text{C}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$T_u = 15 + 273,16 = 288,16 \text{ K} \quad T = 100 + 273,16 = 373,16 \text{ K}$$

$$E = m \cdot c_p \left( T - T_u - T_u \cdot \ln \left( \frac{T}{T_u} \right) \right) + \frac{m}{2} \cdot c^2 + m \cdot g \cdot z$$

$$E = 1000 \text{ kg} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \left( 373,16 \text{ K} - 288,16 \text{ K} - 288,16 \text{ K} \cdot \ln \frac{373,16}{288,16} \right) + 0 + 0 = 44050 \text{ kJ} = 12,2 \text{ kWh}$$

$$W_t = \Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 1000 \text{ kg} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 85 \text{ K} = 356150 \text{ kJ} = 98,9 \text{ kWh}$$

$$\zeta = \frac{E}{W_t} = \frac{E_{\text{Nutzen}}}{E_{\text{Aufwand}}} = \frac{\text{abgegebene Exergie} = \text{technische Arbeit}}{\text{aufgenommene Exergie}} = \frac{12,2 \text{ kWh}}{98,9 \text{ kWh}} = 0,123$$

Nur 12,3 % der aufgewendeten Exergie wirkt als Erhöhung der Exergie des Wassers (könnte theoretisch wieder in Arbeit umgewandelt werden), 87,6 % der Exergie wird auf Grund von Dissipation und irreversiblen Wärmeübergang in Anergie umgewandelt und ist thermodynamisch „verloren“.

## 6 Zusammenfassung

Warum wurde dieses Thema so ausführlich behandelt ?

Energiethemen sind derzeit in aller Munde und es gibt auch eine Vielzahl von Publikationen in der Tagespresse und in Fachzeitschriften. Es ist allerdings nicht zu übersehen, dass viele Halbwahrheiten verbreitet werden und technische Berichte oft von wirtschaftlichen Interessen determiniert werden. Dieser sehr theoretisch gehaltene Bericht erhebt keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit, soll aber dazu anregen, sich kritisch mit den aktuellen Energiethemen auseinanderzusetzen.

Die meisten Technologien sind ja schon lange bekannt, auf fossilen Brennstoffen basierende niedrige Energiepreise und physikalische Einschränkungen bremsen jedoch Entwicklung und Verbreitung. Klimaschutzziele und die Energiepreisentwicklung der letzten Zeit fördern nun die Entwicklung und Verbreitung ökologischer Energieanwendungen, die physikalischen Einschränkungen sind natürlich nach

wie vor vorhanden. Wenn man sich dieser physikalischen Einschränkungen bewusst ist, trägt dies wesentlich dazu bei, Energiesysteme ökologisch, technisch und wirtschaftlich optimal einzusetzen.

Kernaussagen des Berichtes:

- Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur in andere Formen umgewandelt werden.
- Thermischen Energieumwandlungsprozesse unterliegen dem Carnot - Wirkungsgrad
- Wärme kann nie von selbst von einem System niedriger Temperatur auf ein System höherer Temperatur übergehen.
- Exergie und Anergie haben eine wesentliche Bedeutung bei der Beurteilung der Energieanwendungen

Dies hat zur Folge, dass beispielhaft angeführte häufig diskutierten Energieanwendungen, wie Verstromung von Biomasse, Fahren mit Wasserstoff, Erdwärme, Kraft-Wärme-Kopplung, Brennstoffzelle etc., vor der Beurteilung des Einsatzes genau betrachtet werden müssen !