

„Technische Thermodynamik“

Prof. Dr.-Ing. habil. Egon Hassel

Universität Rostock

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

WS 2011



Inhalt

1. Einleitung/Abgrenzung
2. Grundbegriffe
3. Erster Hauptsatz
4. Zweiter Hauptsatz
5. Kreisprozesse
6. **Exergie**
7. Zustandsgleichungen realer Gase
8. Gemische
9. Verbrennung
10. Wärmeübertrager
11. Energieumwandlung Wärme-Arbeit



Kapitel 6

Exergie, Teil 1



Exergie : einleitende Bemerkungen

Wie wir schon gesehen haben, gibt es **zwei** unterschiedliche **Qualitäten** von Energie.

Zum einen **unbeschränkt umwandelbare Formen der Energie** z. B. elektrische Energie (Strom, Licht) und mechanische Energie (E_{kin} , E_{pot} , Drehen einer Welle).

Zum anderen die **Wärme- oder innere Energie** oder Enthalpie

Obwohl z.B. die Ozeane eine gigantische Menge an Energie in Form von innerer Energie beinhalten, kann man diese kaum nutzen.

Warum nicht?



Exergie : einleitende Bemerkungen

Dies haben wir schon am Ende des letzten Kapitels über die Entropie gesehen.

Eine Wärmemenge Q_A , die bei der Temperatur T_A vorliegt, kann nur zur Umwandlung in Arbeit W genutzt werden, falls ein Kaltreservoir mit T_B zur Verfügung steht und die maximale Umwandlungsrate ist

$$\eta_{rev} = \eta_C = \frac{(T_A - T_B)}{T_A}$$

Diesen Grundgedanken wollen wir etwas mehr formalisieren.



Exergie : einleitende Bemerkungen

Das Ziel dabei ist, einen Formalismus zu entwickeln, mit welchem auch sehr komplizierte Prozesse, z. B. ganze Kraftwerke, daraufhin untersucht werden können, ob sie thermodynamisch optimal arbeiten oder wo sie verbessert werden können, z.B. welcher Teilprozess den größten Verlust bringt.



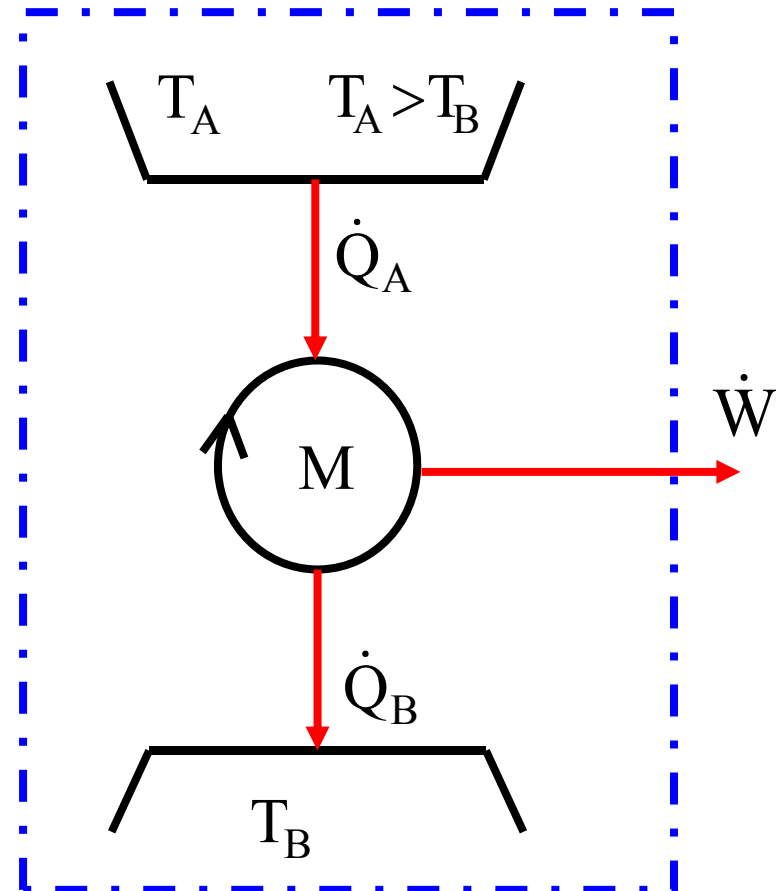
Exergie : einleitende Bemerkungen

Zur besseren Vorstellung
des im folgenden Gesagten:

Bei dem als Beispiel
herangezogenen Wärmekraftprozess,
zwischen T_A und T_B definiert man

$$Q_A = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

$$Q_A = \eta_C \cdot Q_A + (1 - \eta_C) \cdot Q_A$$



Exergie : einleitende Bemerkungen

$$Q_A = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

$$Q_A = \eta_C \cdot Q_A + (1 - \eta_C) \cdot Q_A$$

Exergie der Wärme ist der Anteil der Wärme, der **unbeschränkt** in andere Energieformen umgewandelt werden kann.

Anergie ist der Rest.

Exergie der Wärme hängt damit von der Temperaturdifferenz oder man sagt auch von der Umgebung ab, weil oft / meist die Umgebung als Wärmesenke für die „Abfall“-Wärme dient.



Exergie : einleitende Bemerkungen

$$Q_A = \text{Exergie} + \text{Anergie} \quad Q_A = \eta_C \cdot Q_A + (1 - \eta_C) \cdot Q_A$$

Der Gedanke geht weiter:

Mit einem reversiblen Prozess kann man maximale Arbeit aus der Wärme Q_A gewinnen. Diese ist gleich der Exergie dieser Wärme, aber nicht 100%.

Mit einer realen Maschine mit Verlusten, d.h. mit Reibung, gewinnt man weniger Arbeit.

Also macht es Sinn, einen so genannten exergetischen Gütegrad oder exergetischen Wirkungsgrad zu definieren.



Exergie : einleitende Bemerkungen

$$Q_A = \text{Exergie} + \text{Anergie} \quad Q_A = \eta_C \cdot Q_A + (1 - \eta_C) \cdot Q_A$$

Also: Exergetischer Wirkungsgrad:

$$\begin{aligned} \eta_E &= \frac{\text{Arbeit reale Maschine}}{\text{Arbeit optimale Maschine}} = \frac{\text{Arbeit reale Maschine}}{\text{Arbeit reversible Maschine}} = \\ &= \frac{\text{Exergieabgabe reale Maschine}}{\text{Exergie der Wärme}} = \\ &= \frac{\text{Exergieabgabe reale Maschine}}{\eta_C \cdot Q_A} \end{aligned}$$

Arbeit ist reine Exergie



Exergie : einleitende Bemerkungen

$$Q_A = \text{Exergie} + \text{Anergie} \quad Q_A = \eta_C \cdot Q_A + (1 - \eta_C) \cdot Q_A$$

$$\eta_E = \frac{\text{Exergieabgabe reale Maschine}}{\eta_C \cdot Q_A}$$

Ein Carnot-Prozess und jeder reversible Kreisprozess hat also den exergetischen Wirkungsgrad 1.



Umwelt und Energieumwandlung

Unsere Umwelt ist nicht im thermodynamischen Gleichgewicht,
z. B. örtlich verschiedene Temperaturen oder mangelndes
chem. Gleichgewicht.

Als **Umgebung** bezeichnet man einen solchen (willkürlich
abgetrennten Teil) der Umwelt, der sich (hinreichend genau) im
thermodynamischen Gleichgewicht befindet und der so groß ist,
dass sich während des betrachteten Prozesses seine intensiven
Zustandsgrößen nicht merklich ändern, z. B. Luft, Flüsse, Meer.



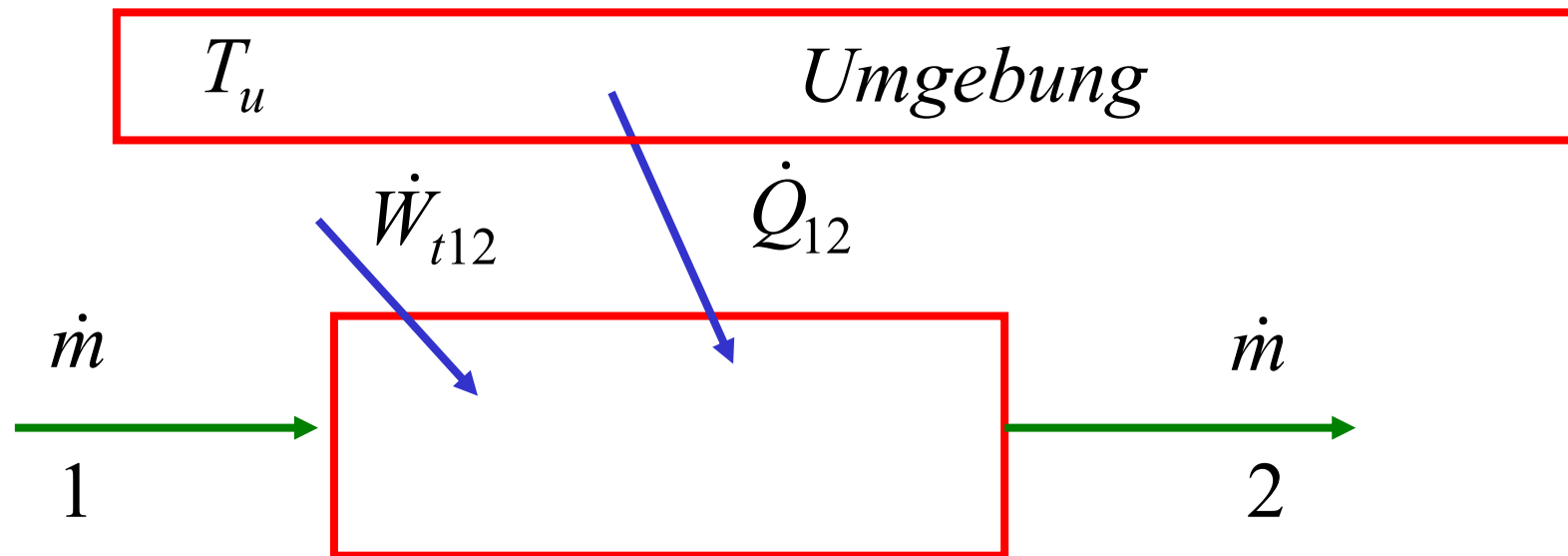
Umwelt und Energieumwandlung

Um Prozesse „von selbst“ ablaufen zu lassen und damit zur Energieumwandlung, z. B. Arbeitsgewinnung, heranzuziehen, genügt es, solche Körper in der Umwelt zu finden, die sich mit der Umgebung nicht im Gleichgewicht befinden.

Solche Körper, die sich im Gleichgewicht mit der Umgebung befinden, können (ohne Eingriff von außen) keinen Zustandsänderungen unterworfen werden und sind daher für Energieumwandlungsprozesse, z. B. Arbeitsgewinnung, wertlos.



Exergie und Anergie

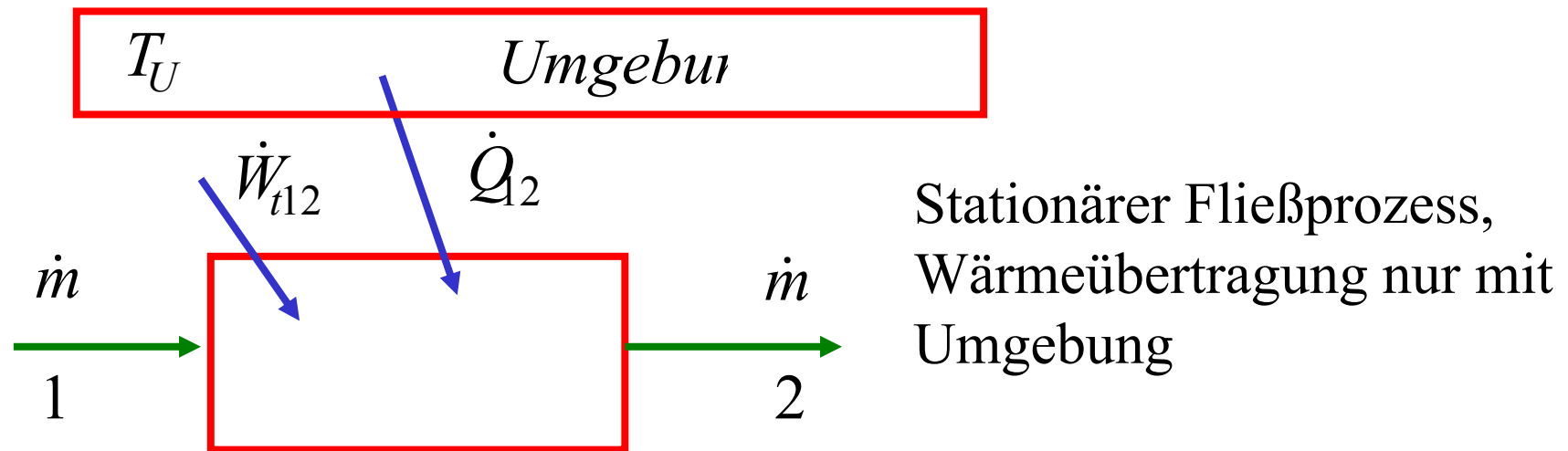


Stationärer Fließprozess, Wärmeübertragung nur mit Umgebung

Herleitung der **Exergie des Stoffstroms 2** im folgenden.



Exergie und Anergie



1. HS:

$$\dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t12} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 + \dot{E}_{a2} - \dot{E}_{a1}$$

2. HS:

$$\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \frac{\dot{Q}_{12}}{T_u} + S_{irr\ 12}$$



Exergie und Anergie

$$\dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t12} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 + \dot{E}_{a2} - \dot{E}_{a1} \quad \dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \frac{\dot{Q}_{12}}{T_u} + \dot{S}_{irr12}$$

Q_{12} eliminieren und nach W_{t12} umstellen:

$$\dot{W}_{t12} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 + \dot{E}_{a2} - \dot{E}_{a1} - T_u(\dot{S}_2 - \dot{S}_1) + T_u \cdot \dot{S}_{irr12}$$

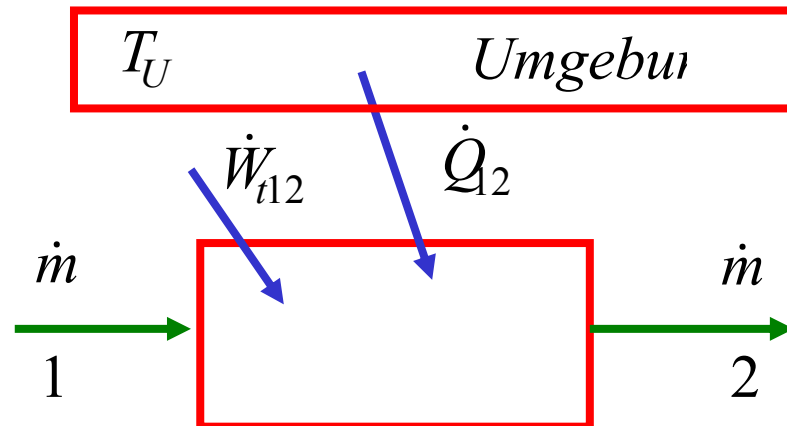
Spezifisch:

$$w_{t12} = h_2 - h_1 + e_{a2} - e_{a1} - T_u(s_2 - s_1) + T_u \cdot s_{irr12}$$



Exergie und Anergie

$$\dot{W}_{t12} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 + \dot{E}_{a2} - \dot{E}_{a1} - T_u(\dot{S}_2 - \dot{S}_1) + T_u \cdot \dot{S}_{irr12}$$



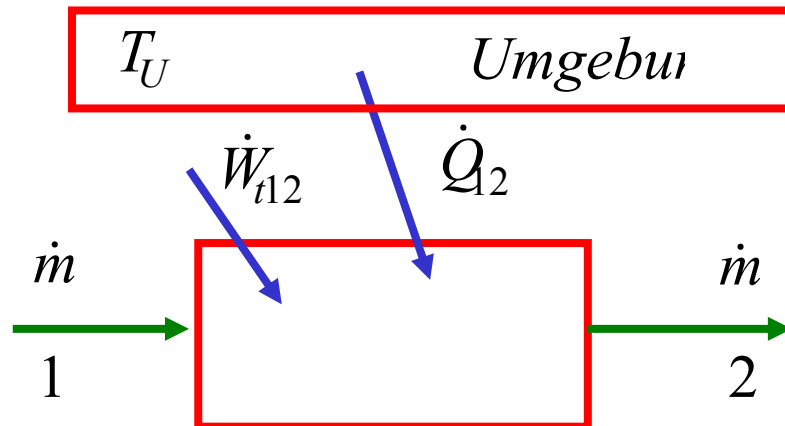
Wenn man jetzt annimmt, dass das Medium im Zustand 1 gerade Umgebungszustand hat **1=U** und man die **Mindestarbeit** ausrechnet, die man benötigt,

um das Medium vom Zustand 1=U in den Zustand 2 zu bringen, dann ist das genau die gewünschte **Exergie des Stoffstroms 2**, denn die Mindestarbeit wendet man beim **reversiblen** Prozess auf, d.h. man kann dieselbe Arbeit dann auch wieder vom Stoffstrom 2 bekommen und das genau meint die Exergie des Stoffstroms 2.



Exergie und Anergie

$$\dot{W}_{t12} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 + \dot{E}_{a2} - \dot{E}_{a1} - T_u(\dot{S}_2 - \dot{S}_1) + T_u \cdot \dot{S}_{irr12}$$



$$1: p_1 = p_U, T_1 = T_U, \\ E_{a1} = E_{au} = 0$$

⇒

$$\dot{W}_{tu2} = \dot{H}_2 - \dot{H}_u + \dot{E}_{a2} - \cancel{\dot{E}_{au}} - T_u(\dot{S}_2 - \dot{S}_u) + T_u \cdot \cancel{\dot{S}_{irr12}} = \dot{E}_{2u}$$



Exergie und Anergie

⇒ Exergie eines Stoffstroms:

$$\dot{E}_{1u} = \dot{H}_1 - \dot{H}_u + \dot{E}_{a1} - T_u (\dot{S}_1 - \dot{S}_u)$$

Spezifisch:

$$e_{1u} = h_1 - h_u + e_{a1} - T_u (s_1 - s_u)$$

Die Exergie des Zustands hängt damit vom Zustand des Mediums und dem Umgebungszustand ab.



Exergie und Anergie

Exergie eines Stoffstroms:

$$\dot{E}_{1u} = \dot{H}_1 - \dot{H}_u + \dot{E}_{a1} - T_u (\dot{S}_1 - \dot{S}_u)$$

Energie = Exergie und Anergie

Energie 1: $\dot{H}_{t1} = \dot{H}_1 + \dot{E}_{a1}$

Exergie 1U: $\dot{E}_{1u} = \dot{H}_1 - \dot{H}_u + \dot{E}_{a1} - T_u (\dot{S}_1 - \dot{S}_u)$

Anergie 1U: $\dot{B}_{1u} = \dot{H}_u - T_u (\dot{S}_u - \dot{S}_1)$



Exergie und Anergie

Exergie eines Stoffstroms:

$$\dot{E}_{1u} = \dot{H}_1 - \dot{H}_u + \dot{E}_{a1} - T_u (\dot{S}_1 - \dot{S}_u)$$

Energie = Exergie und Anergie

Spezifisch:

Energie 1: $h_{t1} = h_1 + e_{a1}$

Exergie 1U: $e_{1u} = h_1 - h_u + e_{a1} - T_u (s_1 - s_u)$

Anergie 1U: $b_{1u} = h_u - T_u (s_u - s_1)$



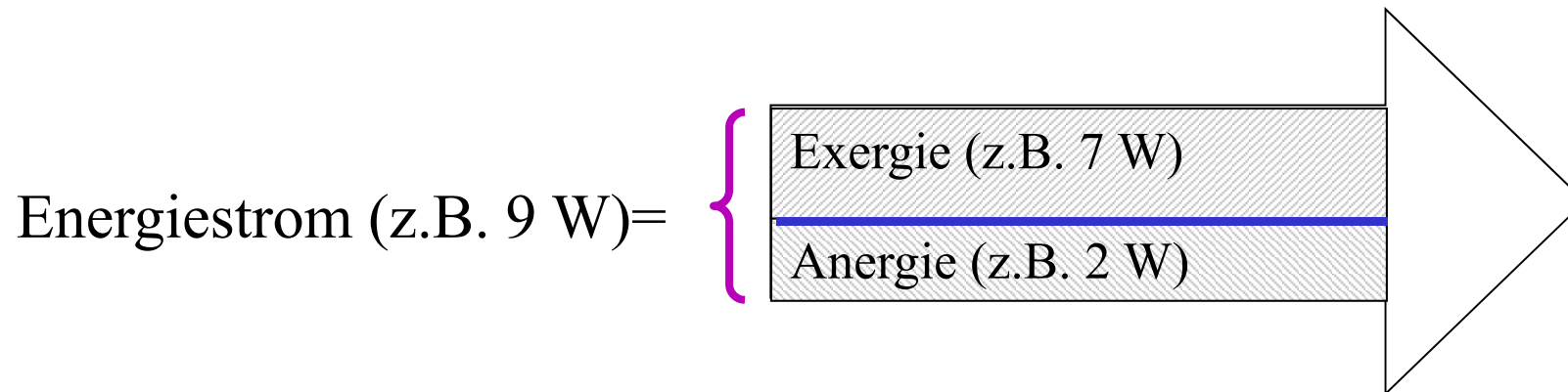
Exergie und Anergie

Exergie-Anergie-Fluss-Diagramm:



Exergie und Anergie

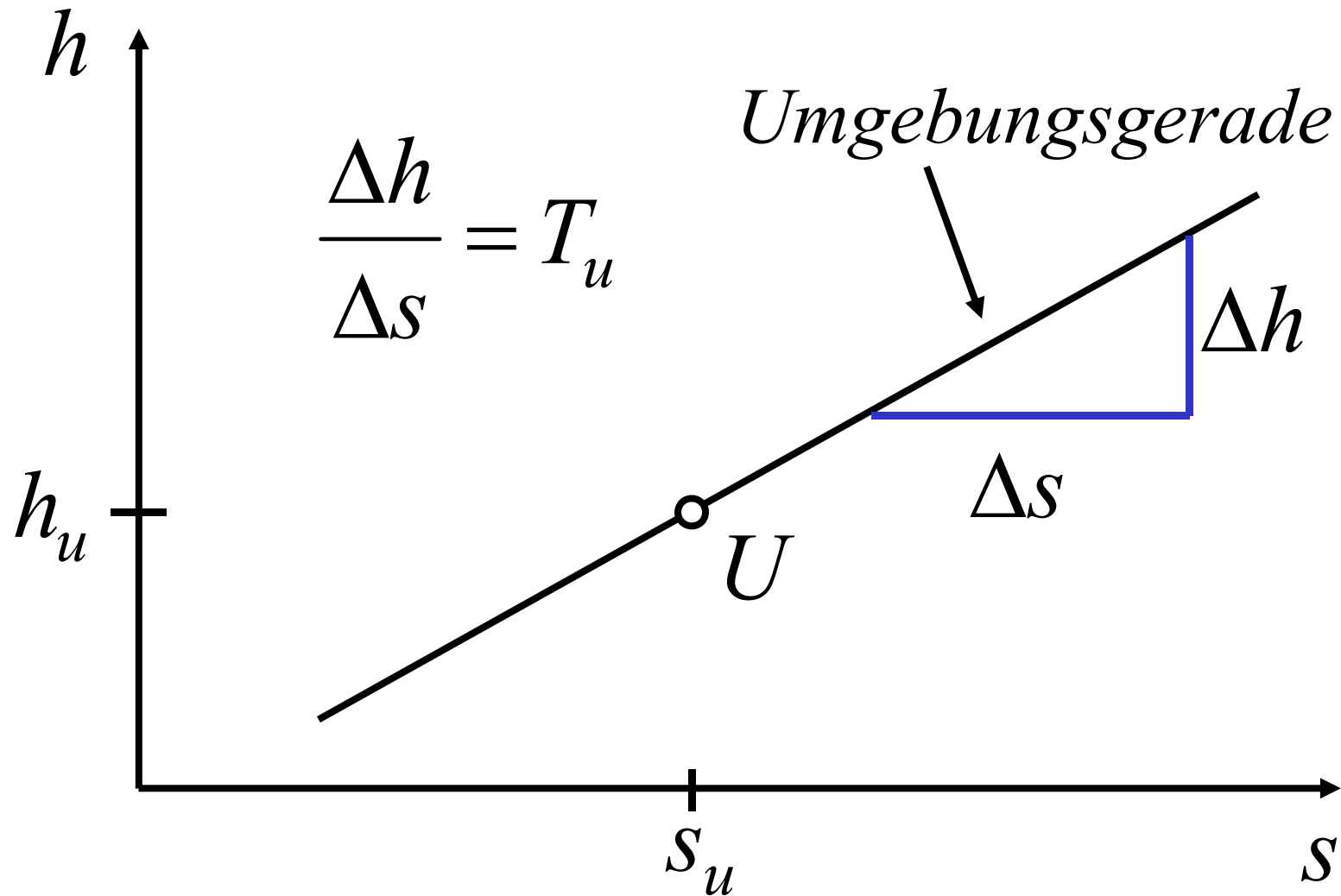
Bei komplexeren Anlagen macht man oft zur Übersichtlichkeit ein **Exergie-Anergie-Fluss-Diagramm**:



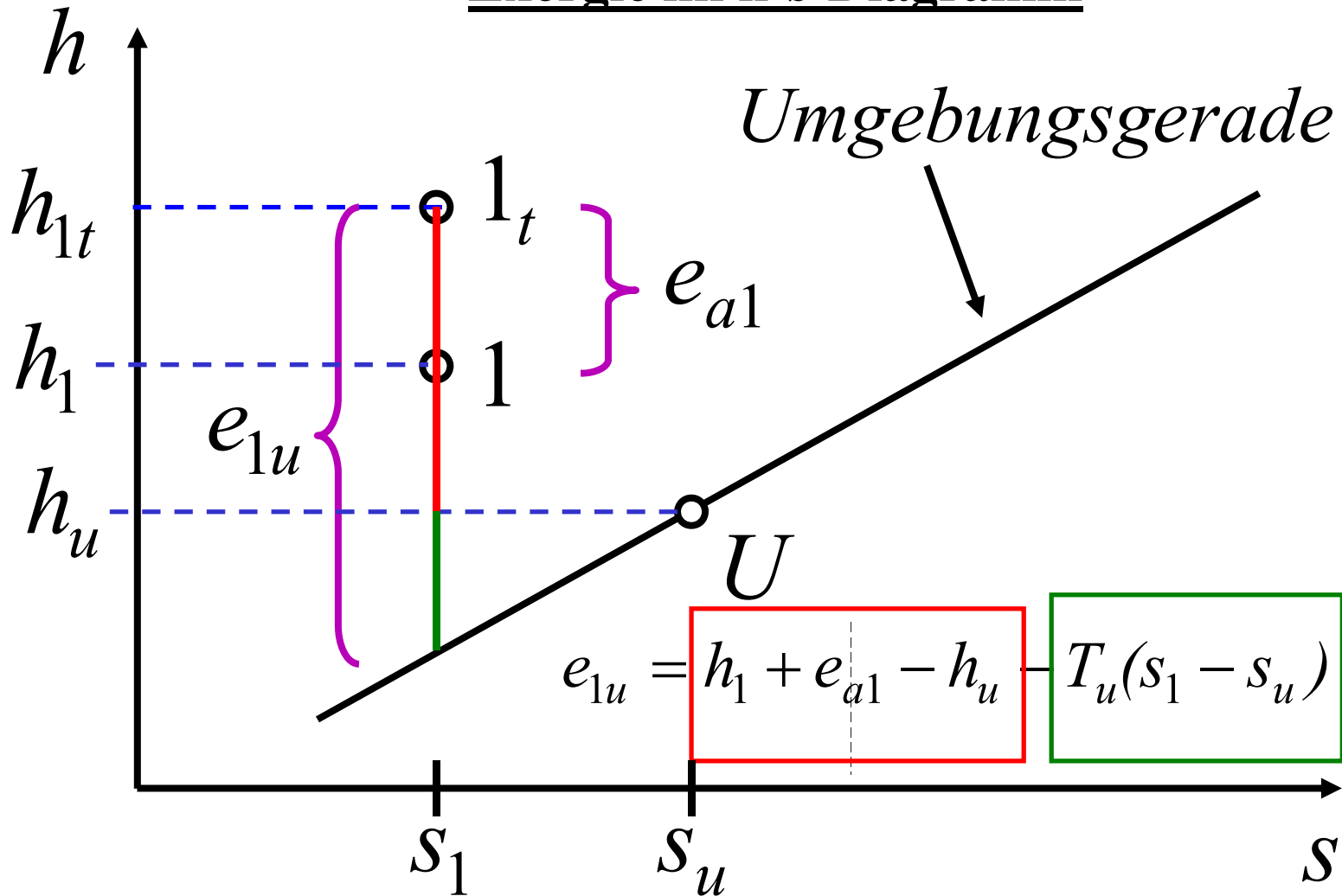
Die Breite des Pfeils und der einzelnen Bahnen entspricht quantitativ der Menge an Energie, Exergie und Anergie.



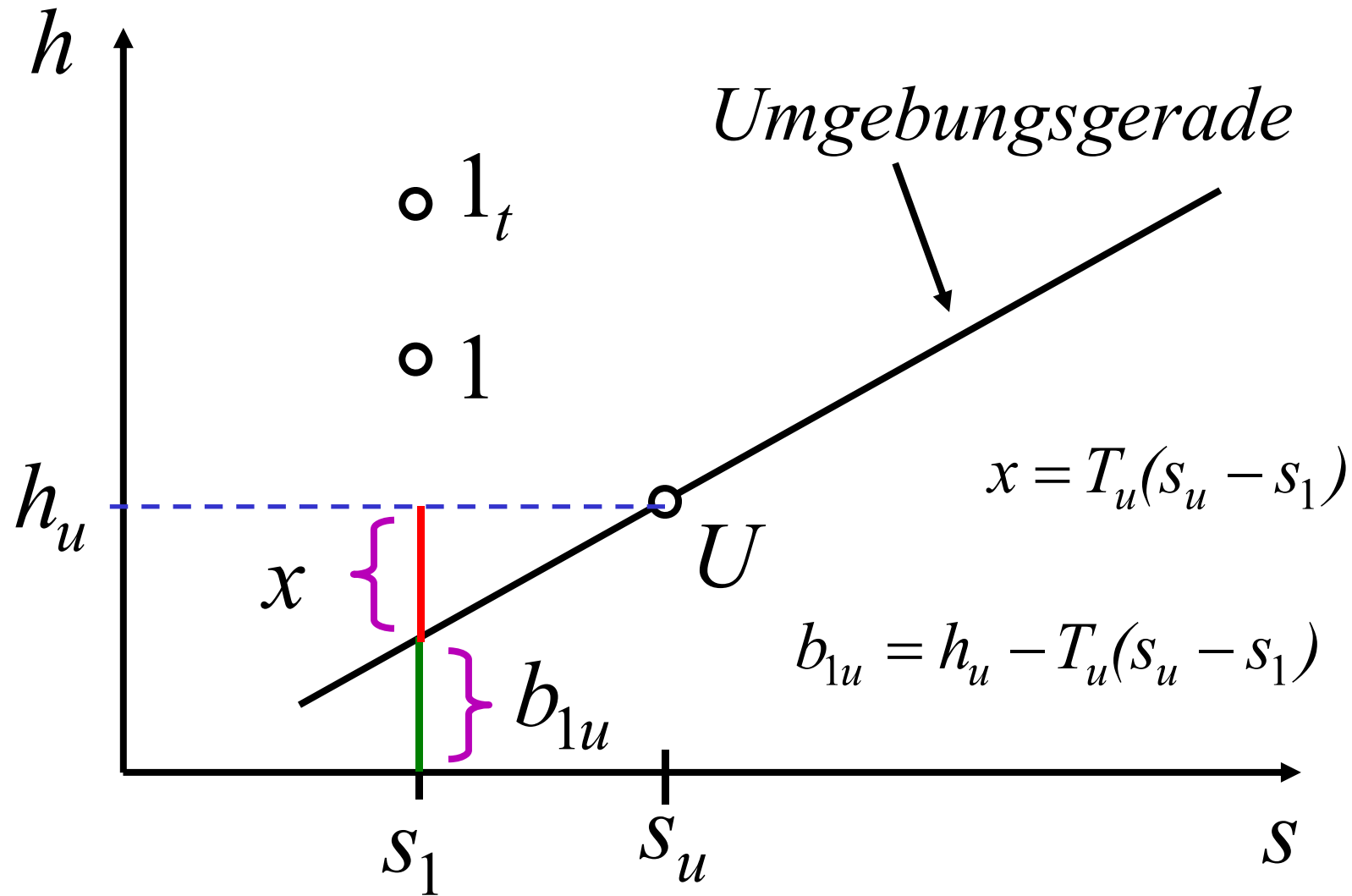
Exergie im h-s-Diagramm



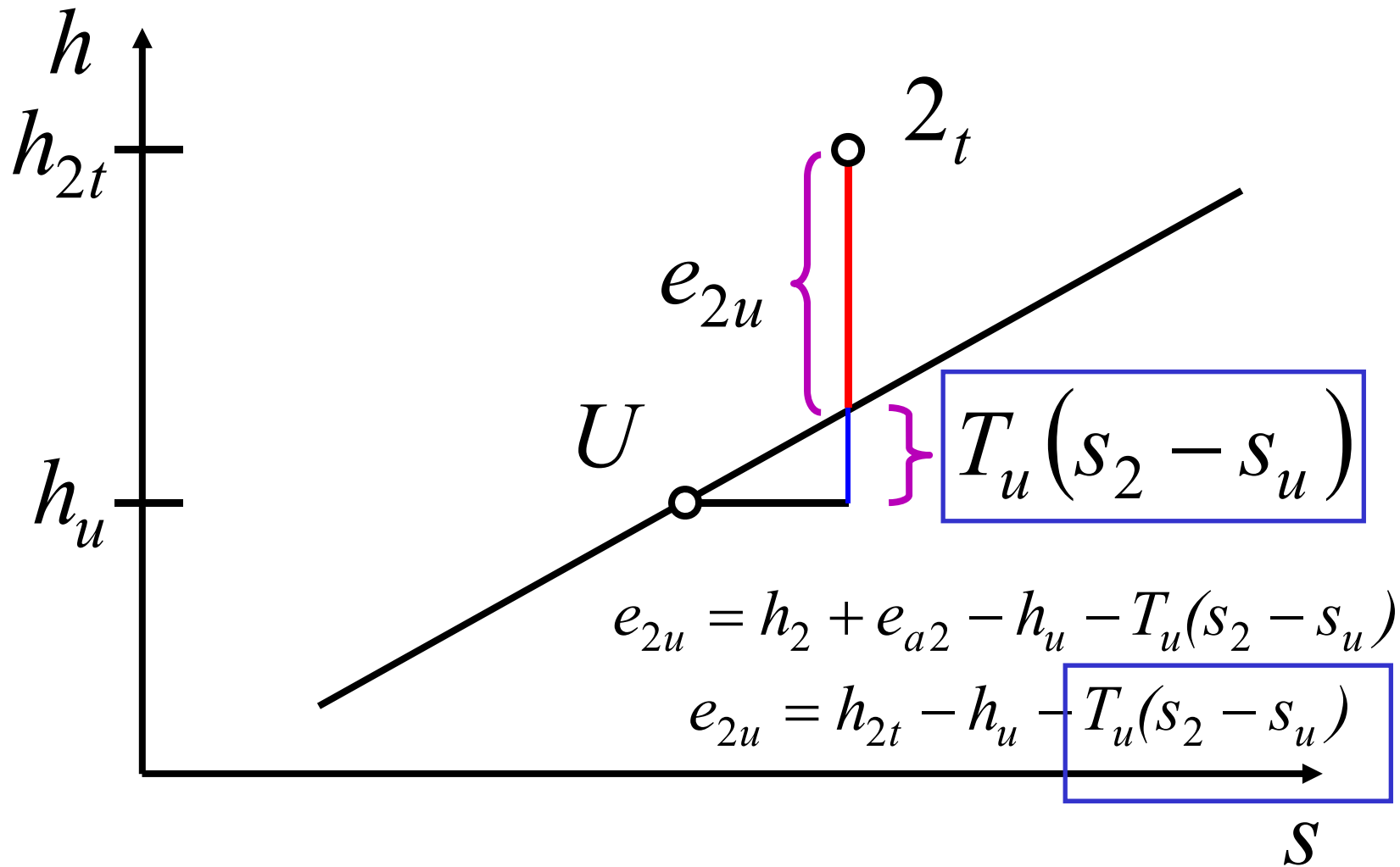
Exergie im h-s-Diagramm



Exergie im h-s-Diagramm



Exergie im h-s-Diagramm



Exergie im h-s-Diagramm

Es existiert ein Umgebungspunkt U im h-s-Diagramm.

Durch U wird eine sogenannte Umgebungsgerade mit der Steigung $\Delta h/\Delta s = T_u = \text{Umgebungstemperatur}$ gezeichnet.

Totalenthalpie h_{t2} ist gleich $h_2 + e_{a2}$.

$$\text{Exergie } 2 = (h_2 + e_{a2}) - h_u - T_u(s_2 - s_u)$$

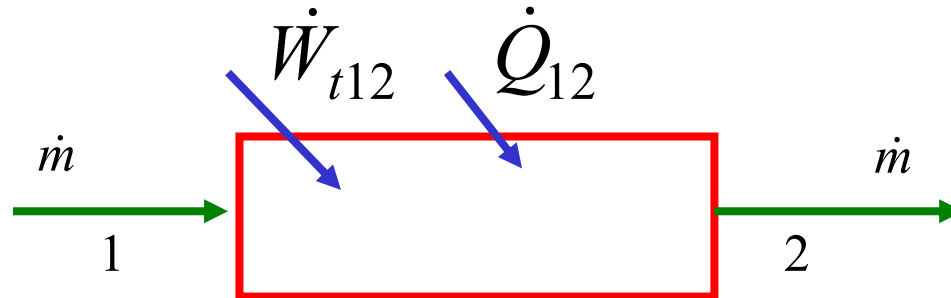
$T_u(s_2 - s_u)$ siehe Diagramm.

$$\text{Anergie } b_{zu} = h_{2t} - e_{zu}.$$

Man sieht die Anergie b_{zu} hängt vom Nullpunkt der h-Achse ab.



Herleitung Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess mit beliebiger Wärmeübertragung



Exergiedifferenz zwischen 1 und 2:

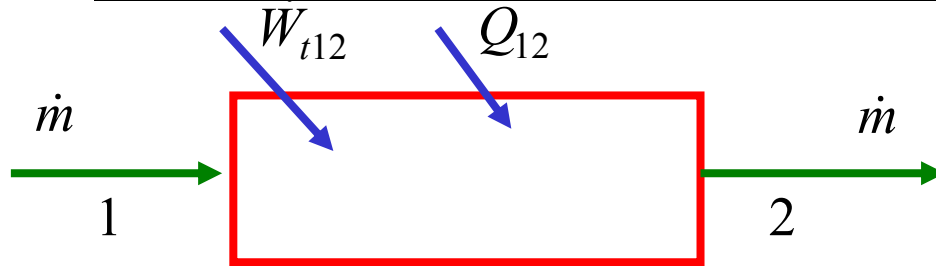
$$\dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} = \underline{\dot{H}_2 - \dot{H}_1} + \dot{E}_{a2} - \dot{E}_{a1} - T_u (\dot{S}_2 - \dot{S}_1)$$

$$1. \text{ HS: } \dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t12} = \underline{\dot{H}_2 - \dot{H}_1} + \dot{E}_{a2} - \dot{E}_{a1}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + T_u (\dot{S}_2 - \dot{S}_1)$$



Herleitung Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess mit beliebiger Wärmeübertragung



$$\dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + T_u (\dot{S}_2 - \dot{S}_1)$$

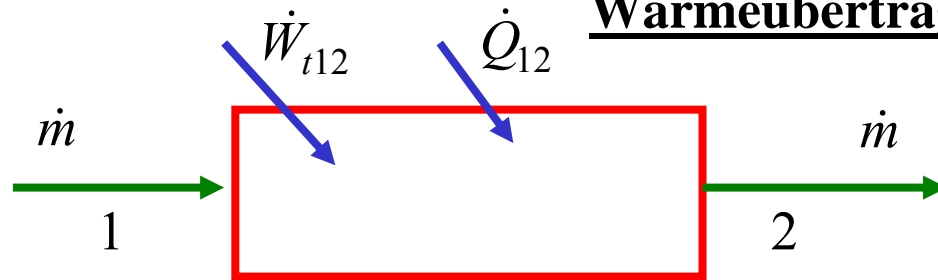
$$\Rightarrow q_{12} + w_{t12} = e_{2u} - e_{1u} + T_u (s_2 - s_1)$$

Und weil gilt: $\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \dot{S}_{aust12} + \dot{S}_{irr12}$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + T_u (\dot{S}_{aust12} + \dot{S}_{irr12})$$



Herleitung Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess mit beliebiger Wärmeübertragung



$$\dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + T_u (\dot{S}_{aust12} + \dot{S}_{irr12})$$

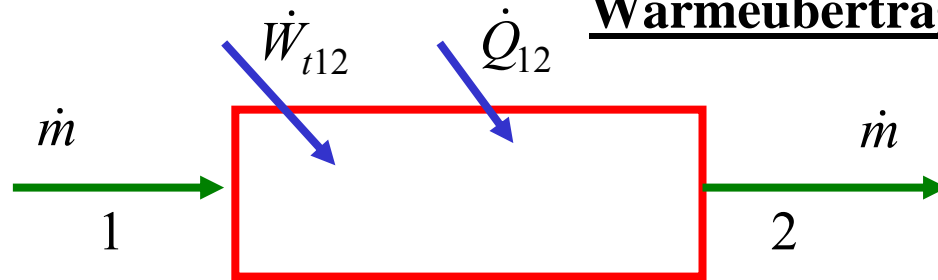
\Rightarrow

$$\underbrace{\dot{Q}_{12} - T_u \dot{S}_{aust12}} + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + \underbrace{T_u \dot{S}_{irr12}}$$

$$\dot{Q}_{12} - T_u \frac{\dot{Q}_{12}}{T} = \dot{Q}_{12} \left(\frac{T - T_u}{T} \right) = \dot{Q}_{12} \eta_C \quad \dot{E}_{v12}$$



Herleitung Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess mit beliebiger Wärmeübertragung



$$\dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + T_u (\dot{S}_{aust12} + \dot{S}_{irr12})$$

\Rightarrow

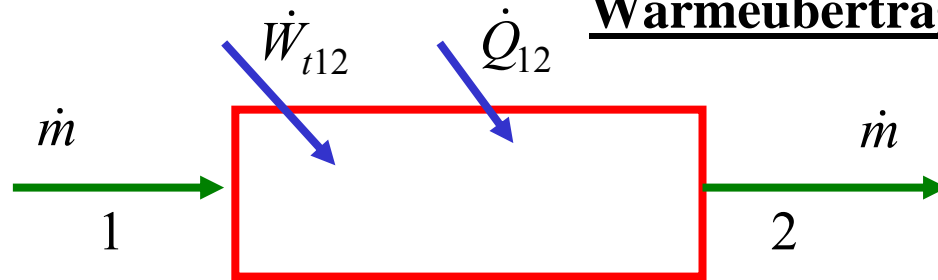
$$\underbrace{\dot{Q}_{12} - T_u \dot{S}_{aust12}} + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + \underbrace{T_u \dot{S}_{irr12}}$$

$$\dot{Q}_{12} - T_u \frac{\dot{Q}_{12}}{T} = \dot{Q}_{12} \left(\frac{T - T_u}{T} \right) = \dot{Q}_{12} \eta_C$$

$$\dot{E}_{v12}$$



Herleitung Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess mit beliebiger Wärmeübertragung



$$\underbrace{\dot{Q}_{12} - T_u \dot{S}_{aust12}} + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + \underbrace{T_u \dot{S}_{irr12}}$$

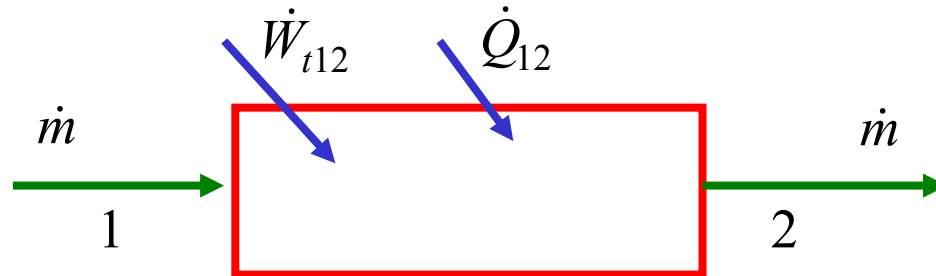
$$\dot{Q}_{12} - T_u \frac{\dot{Q}_{12}}{T} = \dot{Q}_{12} \left(\frac{T - T_u}{T} \right) = \dot{Q}_{12} \eta_C \quad \dot{E}_{v12}$$

$$\dot{Q}_{12} \eta_C + \dot{W}_{t12} = \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u} + \dot{E}_{v12}$$

Exergiebilanz
Stat. Fließprozess



Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess



$$\underbrace{\dot{Q}_{12}\eta_C}_{\text{Exergie der Wärme}} + \underbrace{\dot{W}_{t12}}_{\text{Arbeit ist reine Exergie}} = \underbrace{\dot{E}_{2u} - \dot{E}_{1u}}_{\text{Exergie des Stoffstroms 1 und 2}} + \underbrace{\dot{E}_{v12}}_{\text{Exergieverlust}} \quad \text{Exergiebilanz Stat. Fließprozess}$$

Exergie
der
Wärme

Arbeit
ist
reine
Exergie

Exergie des Stoffstroms 1 und 2

$$\text{Exergieverlust} = T_u \dot{S}_{irr12}$$



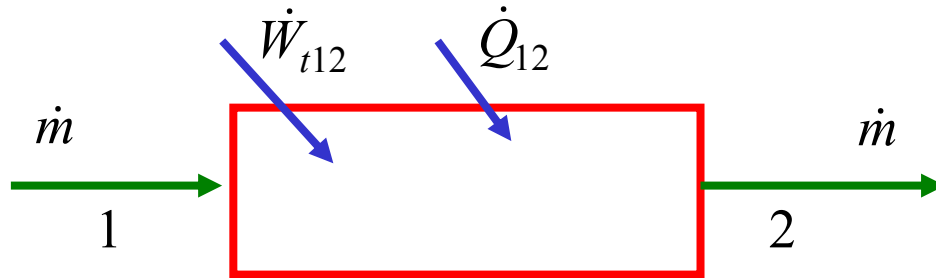
Folie von früher: Bilanzen

Exergiebilanz:

$$\begin{array}{l} \text{Änderung} \\ \text{System-} \\ \text{inhalt} \end{array} = \text{Einfuhr} - \text{Ausfuhr} + \text{Produktion} - \text{Vernichtung}$$



Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess



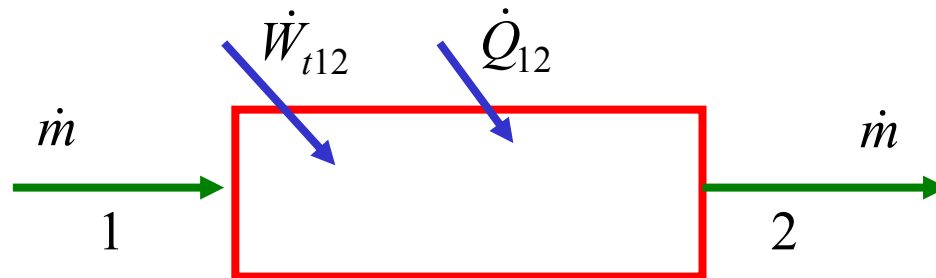
$$\dot{Q}_{12} \eta_C + \dot{W}_{t12} + \dot{E}_{1u} - \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{v12} = 0$$

Exergiebilanz von früher:

~~Änderung Systeminhalt = Einfuhr - Ausfuhr + Produktion - Vernichtung~~



Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess

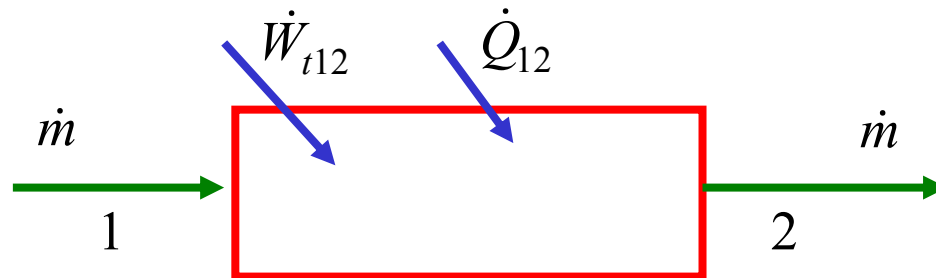


$$\text{Exergiebilanz: } \dot{Q}_{12}\eta_C + \dot{W}_{t12} + \dot{E}_{1u} - \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{v12} = 0$$

In Worten:

Die Exergie der Wärme + die Exergie der Technischen Arbeit + die zuströmende Exergie des Stoffstroms 1 – der abströmenden Exergie durch Stoffstrom 2 – dem Exergieverluststrom = 0

Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess



Exergiebilanz: Beim adiabaten Prozess:

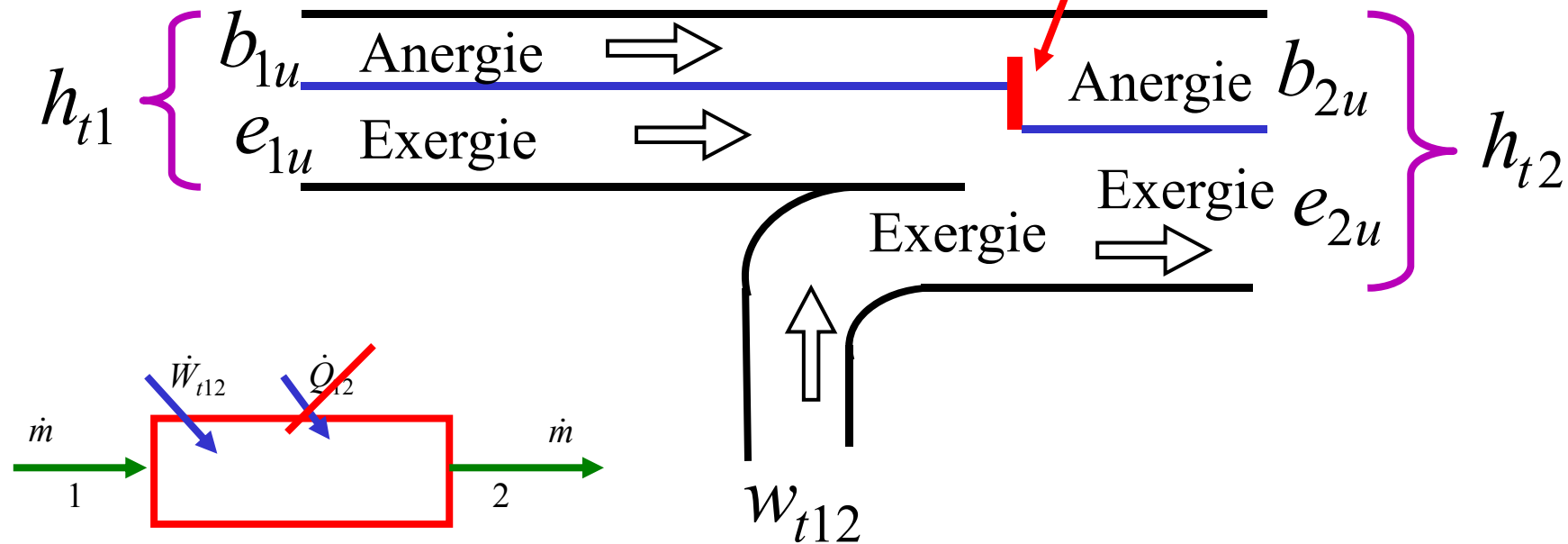
$$\cancel{\dot{Q}_{12} \eta_C} + \dot{W}_{t12} + \dot{E}_{1u} - \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{v12} = 0$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{t12} + \dot{E}_{1u} - \dot{E}_{v12} = \dot{E}_{2u}$$

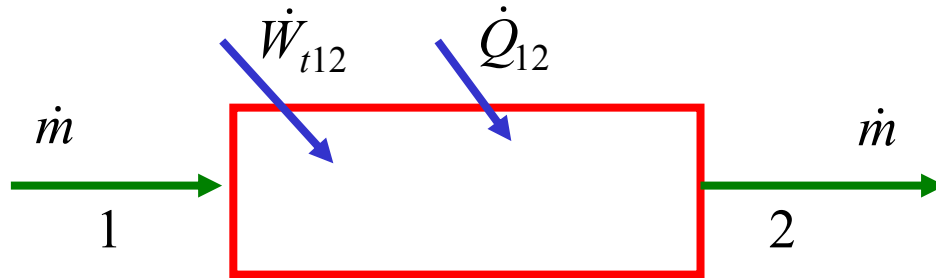
Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess

Beim adiabaten Prozess:

$$w_{t12} + e_{1u} - e_{v12} = e_{2u}$$



Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess



Exergiebilanz:
$$\dot{Q}_{12}\eta_C + \dot{W}_{t12} + \dot{E}_{1u} - \dot{E}_{2u} - \dot{E}_{v12} = 0$$

Folgerungen:

A) Die Exergie der Wärme ist
$$\dot{E}_{q12} = \eta_C \dot{Q}_{12}$$

B) Arbeit und E_{kin} und E_{pot} ist reine Exergie
$$\dot{E}_{wt12} = \dot{W}_{t12}$$

$$\dot{E}_{Epot} = \dot{E}_{pot} \quad \dot{E}_{Ekin} = \dot{E}_{kin}$$



Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess

Folgerungen:

C) Der Exergieverlust ist immer

$$\dot{E}_{v12} = T_u \dot{S}_{irr12} \geq 0$$

D) Exergie ist der Anteil einer Energie, die sich in jede beliebige andere Energieform umformen lässt.

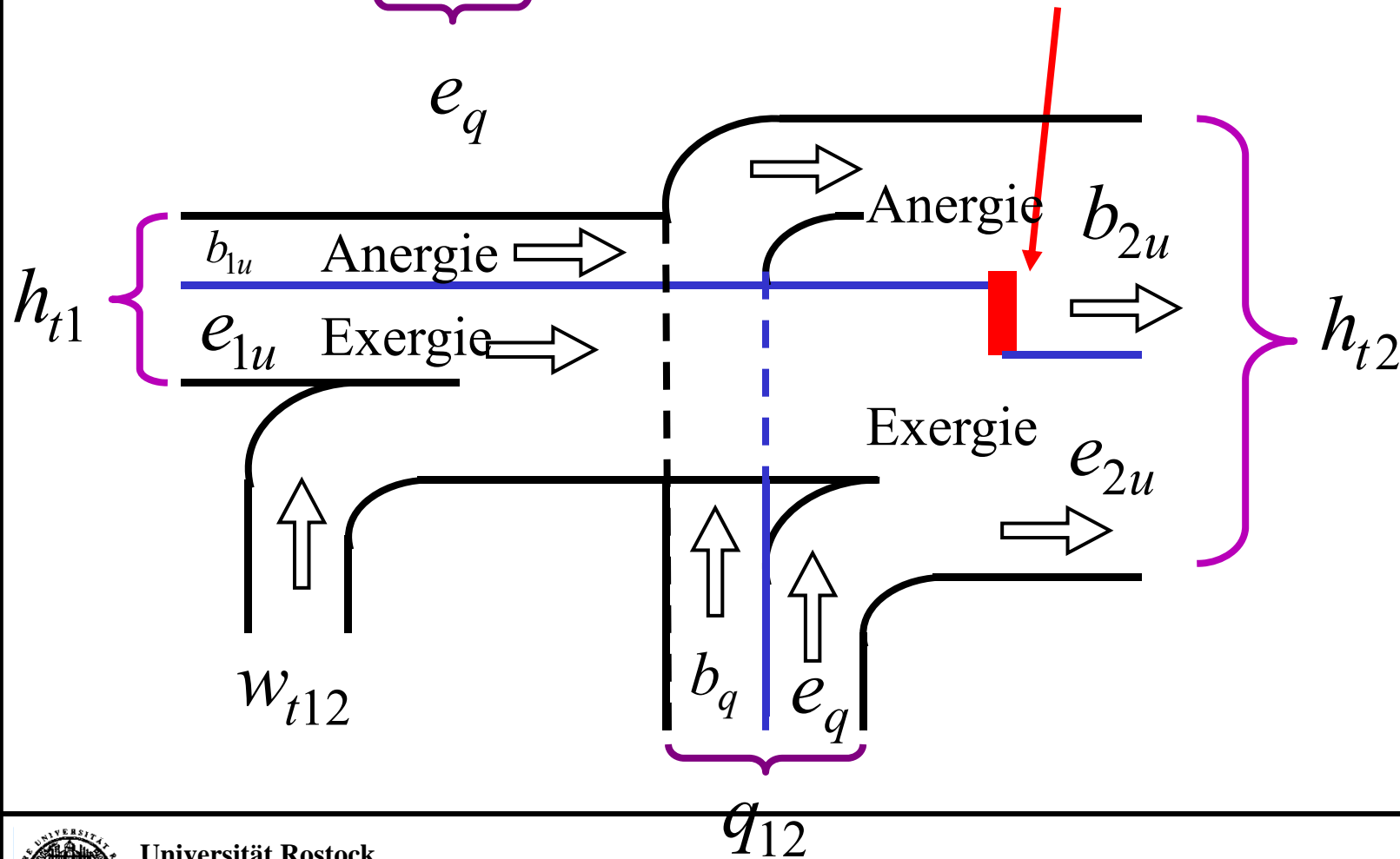
E) Aus Anergie lässt sich keine Exergie gewinnen.

F) Durch Irreversibilitäten nimmt die Exergie ab und die Anergie zu.



Exergiebilanz beim Stat. Fließprozess

$$\underbrace{\eta_C q_{12}}_{e_q} + w_{t12} + e_{1u} - e_{v12} = e_{2u}$$



Exergie der Wärme

$$\dot{E}_q = \dot{Q} - T_u \dot{S}_Q = \eta_C \dot{Q} = \frac{T - T_u}{T} \dot{Q} \quad \text{Exergie der Wärme}$$

$$\Rightarrow \dot{E}_q = \int_1^2 \dot{E}_q dt = \int_{t=t_1}^{t=t_2} \frac{T(t) - T_u}{T(t)} \dot{Q}(t) dt$$

$$\Rightarrow E_q = \int_1^2 \frac{T - T_u}{T} \delta Q \quad \Rightarrow e_q = \int_1^2 \frac{T - T_u}{T} \delta q$$



Anergie der Wärme

$$\dot{E}_q = \dot{Q} - T_u \dot{S}_Q = \eta_C \dot{Q} = \frac{T - T_u}{T} \dot{Q}$$

Energie = Exergie + Anergie

$$\Rightarrow \dot{B}_q = \frac{T_u}{T} \dot{Q} \quad \text{Anergie der Wärme}$$

$$\Rightarrow b_q = \int_1^2 \frac{T_u}{T} \delta q$$



Exergie und Anergie der Wärme

$$\dot{E}_q = \dot{Q} - T_u \dot{S}_Q = \eta_C \dot{Q} = \frac{T - T_u}{T} \dot{Q}$$

Folgerungen I:

Exergie der Wärme = Carnot- Wirkungsgrad mal Wärme.

Exergie der Wärme ist um so größer je größer die Temperatur-Differenz zur Umgebung ist ($T - T_u$), also auch je höher die Temperatur ist, bei welcher die Wärme anfällt.

Wärme bei der Umgebungstemperatur ist reine Anergie.

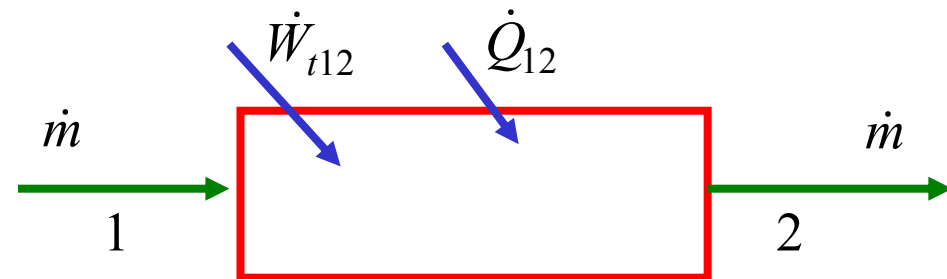


Exergie und Anergie der Wärme

Folgerungen II:

Der Exergieverlust durch Reibung (Dissipation) ist umso größer je kleiner die Temperaturen sind:

(Siehe nächste Folie)



$$e_2 = e_1 + e_{wt12} + e_{q12} - e_{v12} =$$

$$e_1 + w_{t12} + \underbrace{\eta_C q_{12} - T_u s_{irr12}}$$

Hat 2 Anteile: durch WÜ und durch Reibung




Exergie und Anergie der Wärme

Folgerungen II:

Der Exergieverlust durch Reibung (Dissipation) ist umso größer je kleiner die Temperaturen sind:

$$e_2 = e_1 + w_{t12} + \eta_C q_{12} - \underbrace{T_u s_{irr12}}$$

Der Exergieverlust
durch Reibung ist

$$e_{vR} = T_u \frac{w_R}{T}$$


Den Anteil durch WÜ haben wir schon früher besprochen, muss man ggf. durch 2. HS ausrechnen..



Exergieverlust bei der Wärmeübertragung

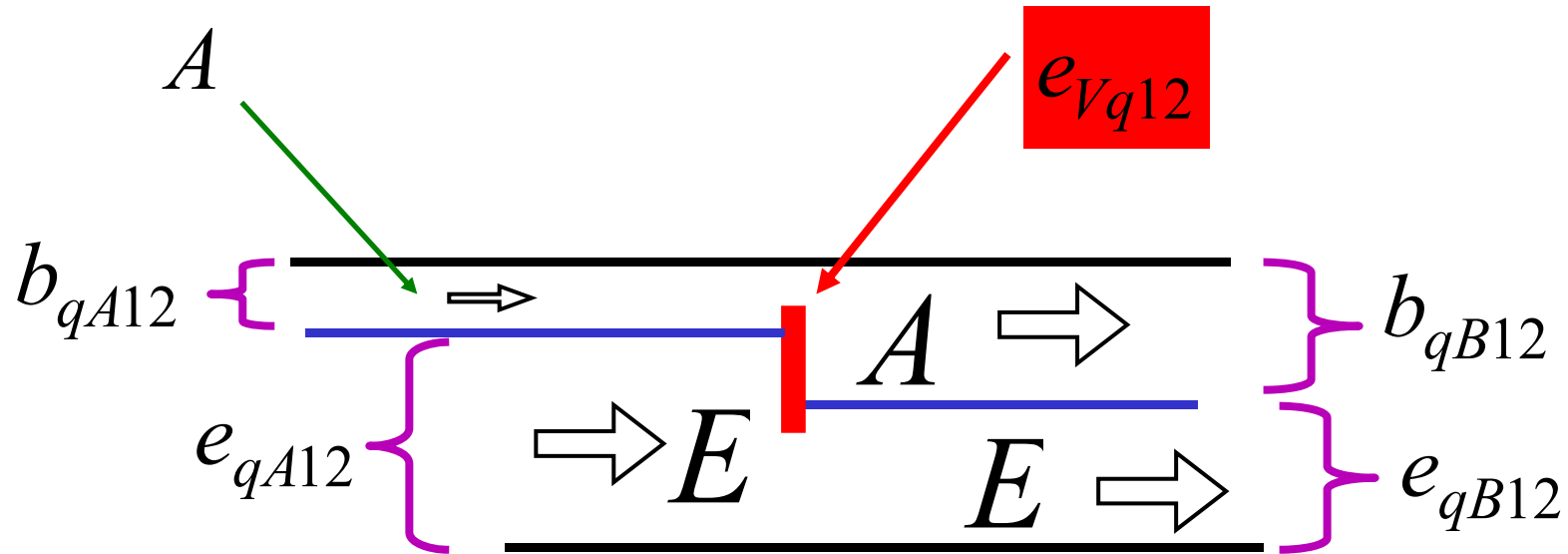
Es gibt bei der Wärmeübertragung 3 Exergieverluste:

- 1) Exergieverlust im System A, z.B. durch Reibung
- 2) Exergieverlust im System B, z.B. durch Reibung
- 3) Exergieverlust durch die Wärmeübertragung zwischen A und B



Exergieverlust bei der Wärmeübertragung

Mittlerer Teil vergrößert:



$$\Rightarrow e_{vq12} = |b_{qB12}| - |b_{qA12}| = Tu \left(\int_1^2 \frac{\delta q}{T_B} - \int_1^2 \frac{\delta q}{T_A} \right) \geq 0$$

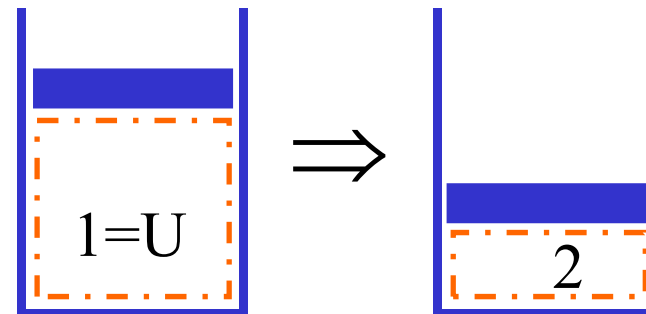


Exergie geschlossener Systeme (Maximale Arbeit)

Betrachte geschlossenes System:

Zustandsänderung von Umgebungszustand $1 = U$ in den beliebigen Zustand 2.

Wärmeübertragung nur mit Umgebung; $E_{\text{au}} = 0$



Exergie geschlossener Systeme (Maximale Arbeit)

$$1. \text{ HS: } \quad Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1}$$

$W_{12} = \text{Nutzarbeit } (W_N) + \text{Arbeit gegen Atmosphäre } (W_A)$

$$W_A = -p_u (V_2 - V_1) \quad 2. \text{ HS: } \quad S_2 - S_1 = \frac{Q_{12}}{T_u} + S_{irr12}$$

Mindestarbeit W_{Nmin} falls $S_{irr12} = 0$ $1 = U$



Exergie geschlossener Systeme (Maximale Arbeit)

$$1. \text{ HS: } \quad Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1}$$

$W_{12} = \text{Nutzarbeit } (W_N) + \text{Arbeit gegen Atmosphäre } (W_A)$

$$W_A = -p_u (V_2 - V_1)$$

$$2. \text{ HS: } \quad S_2 - S_1 = \frac{Q_{12}}{T_u} + S_{irr12}$$

Mindestarbeit W_{Nmin} falls $S_{irr12} = 0$



Exergie geschlossener Systeme (Maximale Arbeit)

$$1. \text{ HS: } \quad Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 + E_{a2}$$

W_{12} = Nutzarbeit (W_N) + Arbeit gegen Atmosphäre (W_A)

$$W_A = -p_u (V_2 - V_1) \quad 2. \text{ HS: } \quad S_2 - S_1 = \frac{Q_{12}}{T_u}$$

$$\Rightarrow T_u (S_2 - S_1) + W_{N \min} + W_A = U_2 - U_1 + E_{a2}$$

$$\Rightarrow T_u (S_2 - S_1) + W_{N \min} - p_u (V_2 - V_1) = U_2 - U_1 + E_{a2}$$

$$\Rightarrow W_{N \min} = U_2 - U_1 + E_{a2} + p_u (V_2 - V_1) - T_u (S_2 - S_1)$$



Exergie geschlossener Systeme (Maximale Arbeit)

$$W_{N \min} = U_2 - U_1 + E_{a2} - T_u (S_2 - S_1) + p_u (V_2 - V_1)$$

$$W_{N \min} = E_{2u}$$

$$E_{2u} = U_2 - U_u + E_{a2} - T_u (S_2 - S_u) + p_u (V_2 - V_u)$$

= Exergie des Zustandes 2, geschlossenes System



Exergieänderung zwischen allgemeinem Zustand 1 und allgemeinem Zustand 2, geschlossenes System

Von vorhin:

$$Q_{12} + W_{N12} + W_{A12} = U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1}$$

⇒ Exergie 1,2:

$$E_{12} = W_{N12} = U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1} - Q_{12} - W_{A12}$$

Andererseits:

Exergieänderung = Exergie – Exergie + Exergieverlust
 E_{12} nachher vorher

$$E_{12} = E_{2u} - E_{1u} + E_{v12}$$



**Exergieänderung zwischen allgemeinem Zustand 1 und
allgemeinem Zustand 2 , geschlossenes System**

$$E_{12} = W_{N12} = U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1} - Q_{12} - W_{A12}$$

$$E_{2u} = U_2 - U_u + E_{a2} - T_u (S_2 - S_u) + p_u (V_2 - V_u)$$

$$E_{1u} = U_1 - U_u + E_{a1} - T_u (S_1 - S_u) + p_u (V_1 - V_u)$$

$$E_{12} = E_{2u} - E_{1u} + E_{v12} =$$

$$U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1} - T_u (S_2 - S_1) + p_u (V_2 - V_1)$$

Vergleich:

$$E_{12} = W_{N12} = U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1} - Q_{12} - W_{A12}$$



**Exergieänderung zwischen allgemeinem Zustand 1 und
allgemeinem Zustand 2 , geschlossenes System**

$$E_{12} = W_{N12} = U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1} - Q_{12} - W_{A12}$$

$$E_{2u} = U_2 - U_u + E_{a2} - T_u (S_2 - S_u) + p_u (V_2 - V_u)$$

$$E_{1u} = U_1 - U_u + E_{a1} - T_u (S_1 - S_u) + p_u (V_1 - V_u)$$

$$E_{12} = E_{2u} - E_{1u} + E_{v12} =$$

$$\cancel{U_2 - U_1} + \cancel{E_{a2} - E_{a1}} - T_u (S_2 - S_1) + \cancel{p_u (V_2 - V_1)} + E_{v12}$$

Vergleich:

$$E_{12} = W_{N12} = \cancel{U_2 - U_1} + \cancel{E_{a2} - E_{a1}} - Q_{12} - \cancel{W_{A12}}$$



Exergieänderung zwischen allgemeinem Zustand 1 und allgemeinem Zustand 2 , geschlossenes System

$$\Rightarrow -T_u (S_2 - S_1) + E_{v12} = -Q_{12}$$

$$\Rightarrow E_{v12} = T_u (S_2 - S_1) - Q_{12}$$

Nebenrechnung:

$$S_2 - S_1 = \frac{Q_{12}}{T_u} + \frac{W_{R12}}{T_u} = S_{Q12} + S_{irr12}$$

$$\Rightarrow T_u (S_2 - S_1) = Q_{12} + W_{R12} = Q_{12} + T_u S_{irr12}$$

$$\Rightarrow E_{v12} = T_u S_{irr12}$$



Exergieänderung zwischen allgemeinem Zustand 1 und allgemeinem Zustand 2 , geschlossenes System

$$E_{v12} = T_u S_{irr12} \geq 0$$

Exergieverlust,
geschlossenes oder
offenes System

Auch in diesem Fall ist der Exergieverlust gegeben durch $T_u S_{irr}$

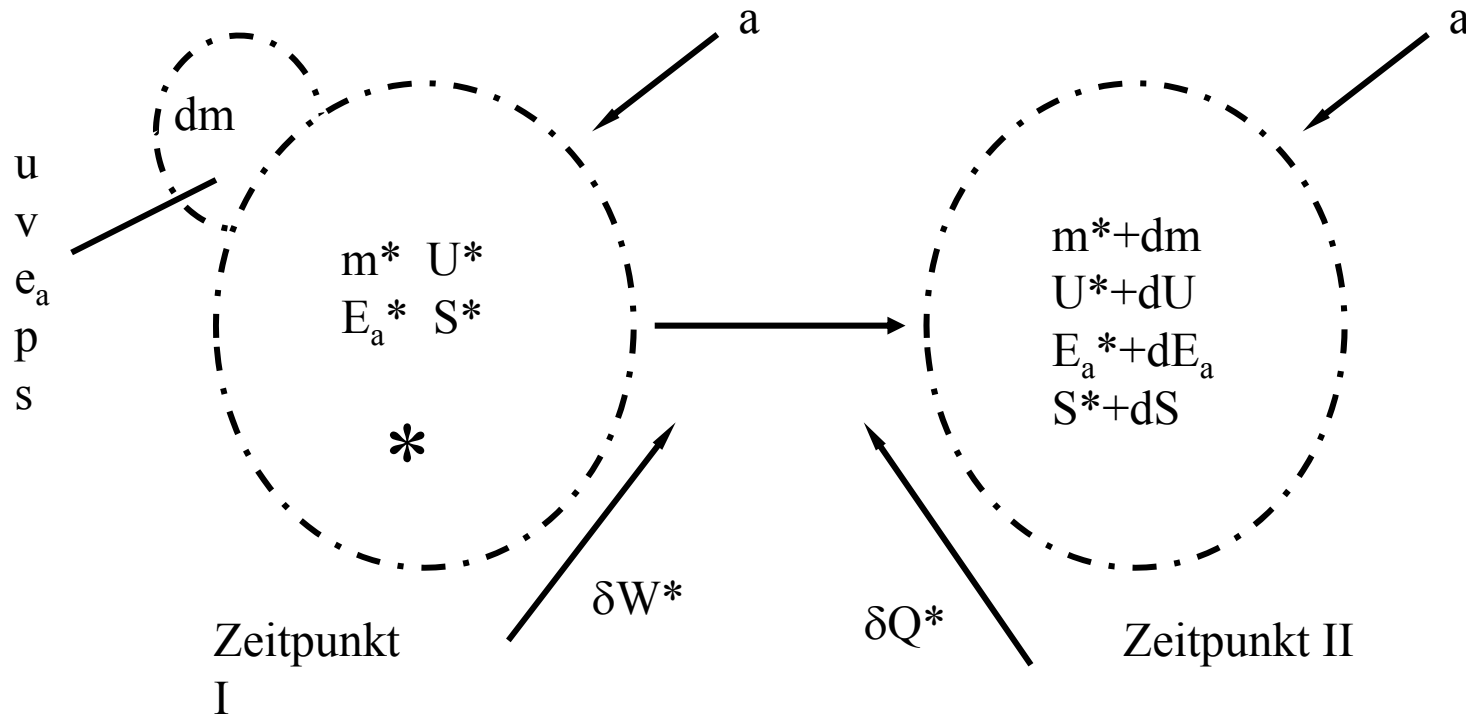


Exergiebilanz offenes System

zur Vollständigkeit



Exergiebilanz offenes System



Exergiebilanz angewendet auf das (geschlossene) System, welches zum Zeitpunkt I das durch a begrenzte System und dm umfasst, wie beim Zweiten HS.



Exergiebilanz offenes System

Allgemeine Exergiebilanz

$$E_q + W_t + E_{\text{Stoffstrom}} = E_{\text{nachher}} - E_{\text{vorher}} + E_v$$

Von früher: Exergie der Wärme: $\delta E_q = \delta Q - T_u \delta S_{\text{aust}}$

$$E_{qI,II} = Q^*_{I,II} - T_u S^*_{\text{aust},I,II}$$

Von früher: Exergie eines Stoffstroms:

$$e_{iu} = h_{ti} - h_u - T_u (s_i - s_u) \quad E_{\text{Stoffstrom}} = \sum_i \int_{t1}^{t1} \dot{m}_i e_{iu} dt$$



Exergiebilanz offenes System

Allgemeine Exergiebilanz

$$E_q + W_t + E_{\text{Stoffstrom}} = E_{\text{nachher}} - E_{\text{vorher}} + E_v$$

Von früher: Exergie geschlossener Systeme

$$E_{1u} = U_1 - U_u + E_{a1} - T_u (S_1 - S_u) + p_u (V_1 - V_u)$$

$$\Rightarrow E_{Iu} = U_I - U_u + E_{aI} - T_u (S_I - S_u) + p_u (V_I - V_u)$$



Exergiebilanz offenes System

$$\Rightarrow E_{Iu} = U_I - U_u + E_{aI} - T_u (S_I - S_u) + p_u (V_I - V_u)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow E_{Iu} = m_I^* u_I^* - m_I^* u_u + m_I^* e_{aI}^* - T_u (m_I^* s_I^* - m_I^* s_u) \\ + p_u (m_I^* v_I^* - m_I^* v_u) \end{aligned}$$

Analog für Zeitpunkt II:

$$\begin{aligned} \Rightarrow E_{IIu} = m_{II}^* u_{II}^* - m_{II}^* u_u + m_{II}^* e_{aII}^* - T_u (m_{II}^* s_{II}^* - m_{II}^* s_u) \\ + p_u (m_{II}^* v_{II}^* - m_{II}^* v_u) \end{aligned}$$



Exergiebilanz offenes System

Setzt man alles ein, sieht man, dass einige Terme wegfallen:

$$\text{Sei: } \Delta m = m_{II} - m_I$$

$$\Delta m u_u + \Delta m p_u v_u =$$

$$(m_I + \Delta m) u_u + (m_I + \Delta m) p_u v_u - m_I u_u - m_I p_u v_u$$

Analog fallen alle Terme mit s_u bzw S_u weg.



Exergiebilanz offenes System

Nun differentiell:

$$\delta Q - T_u \frac{\delta Q}{T} + \delta W_t + dmh_1 + dme_{a1} - dmT_u s_1 =$$
$$dU + dE_a - T_u dS + p_u dV + \delta E_v$$

Exergiebilanz offenes System in differentieller Form

Selten gebraucht, ggf. muss man integrieren.



Exergiebilanz offenes System

Exergiefluss in und aus dem System

$$\delta Q - T_u \frac{\delta Q}{T} + \delta W_t + dmh_1 + dme_{a1} - dmT_u s_1 =$$
$$dU + dE_a - T_u dS + p_u dV + \delta E_v$$

Änderung des Exergieinhaltes im
System, auch durch Massenänderung

Exergieverlust



Exergiebilanz offenes System

Exergie der Technischen Arbeit

Exergie der Wärme

$$\frac{T - T_u}{T} \delta Q$$

Exergie Stoffstrom

$$\delta Q - T_u \frac{\delta Q}{T} + \delta W_t + dmh_1 + dme_{a1} - dmT_u s_1 =$$

$$dU + dE_a - T_u dS + p_u dV + \delta E_v$$



Exergiebilanz offenes System

Wenn man mehrere Wärme-, Arbeits- u. Stoffströme hat, muss man alle berücksichtigen, d.h. summieren:

$$\sum_i \frac{T - T_u}{T} \delta Q_i + \sum_j \delta W_{tj} + \sum_k (dmh_k + dme_{ak} - dmT_u s_k) =$$
$$dU + dE_a - T_u dS + p_u dV + \delta E_v$$



Exergieverlust bei adiabater Zustandsänderung im h-s-Diagramm

im geschlossenen System oder beim
stationären Fließprozess



Exergieverlust im h-s-Diagramm bei adiabater ZÄ

Geschlossenes System:

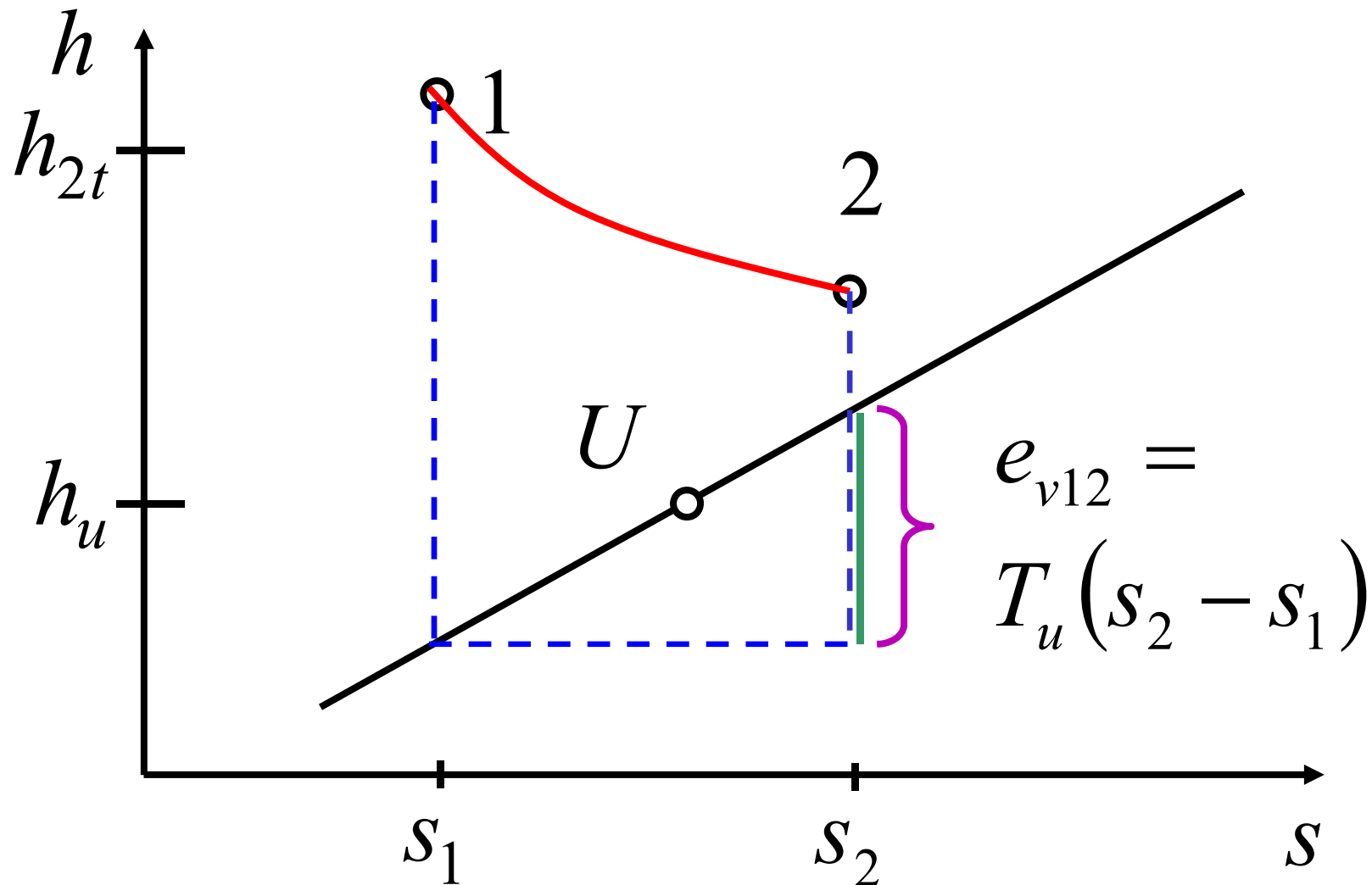
$$S_2 - S_1 = \cancel{\frac{Q_{12}}{T}} + S_{irr\ 12}$$

Stationärer Fließprozess:

$$\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \cancel{\frac{\dot{Q}_{12}}{T}} + \dot{S}_{irr\ 12}$$



Exergieverlust im h-s-Diagramm bei adiabater ZÄ



Abkürzungsverzeichnis

ZÄ = Zustandsänderung

WÜ = Wärmeübertragung

HS = Hauptsatz

