

# Erhöht eine dezentrale Energiebereitstellung die Effizienz der Ressourcen der Primärenergieträger?

Beurteilung auf der Basis einer exergetischen und energetischen Analyse  
einer Strom-Wärme-Kopplung (SWK)

Dr. rer. nat. R. A. Dietrich

Vortrag anlässlich eines  
BWK-Fachgespräches der Bezirksgruppe Lüneburg  
Montag, den 27. Februar 2012

IBSNM

Ingenieur-Büro für Systemanalyse und Numerische Modellierung  
21522 Hohnstorf/Elbe

E-Mail: [Rudolf-Adolf.Dietrich@t-online.de](mailto:Rudolf-Adolf.Dietrich@t-online.de) Homepage: [www.Rudolf-Adolf-Dietrich.de](http://www.Rudolf-Adolf-Dietrich.de)

# Agenda

- § Allgemeiner Überblick
- § Thermische Energie, Exergie, Anergie
- § Exergie-Anergie-Analyse
- § Bewertung
- § Energetische Analyse
- § Bewertung
- § Abschließende Bemerkungen

**Exergie: 1953, Vorschlag von Prof. Rant auf  
der Wärmetagung in Lindau/Bad  
Schachen**

**Anergie: 1963, Vorschlag von Prof. Rant in  
einer Veröffentlichung**

# **Deutscher Ingenieurtag in München am 03. Juni 1964**

## **Thema:**

**Die Anwendung des Exergiebegriffes in der  
Energietechnik**

# Information des BMU's

**BMU-Pressemitteilung Nr. 024/09. In dieser PM wird darauf hingewiesen, dass „die energieeffiziente KWK zunehmend tragender Bestandteil der E-Versorgung werden müsse. Berlin als KWK-Hauptstadt mit einem Anteil von 42 % setze Maßstäbe.“**

## **Exergie-Anergie-Analyse zur Beurteilung einer Kraft-Wärme-Kopplung**

<http://www.rudolf-adolf-dietrich.de/IN007/B-17.pdf>

**Anlage zum Schreiben vom 16.02.2009 an:**

**Frau Bundeskanzlerin Dr. rer. nat. Angela Merkel**

**Frau Bundesministerin Prof. Dr. Annette Schavan**

**Herrn Bundesminister Sigmar Gabriel**

**Herrn Bundesminister Dr. Karl-Theodor Freiherr zu Guttenberg**

**Herrn Nds. Ministerpräsident Christian Wulff**

**Herrn Nds. Umweltminister Hans-Heinrich Sander**

**E.ON AG Herrn Vorstandsvorsitzender Dr. Wulf H. Bernotat**

**RWE AG Herrn Vorstandsvorsitzender Dr. Jürgen Großmann**

**Vattenfall Europe AG Herrn Vorstandsvorsitzender Tuomo Hatakka**

**Antwortschreiben der RWE, Essen, vom 18. März 2009**

<http://www.rudolf-adolf-dietrich.de/IN007/B-17.2.pdf>

## **Energetische Beurteilung des relativen Primärenergiebedarfes bei der Strom- und Wärme-Erzeugung**

<http://www.rudolf-adolf-dietrich.de/IN007/B-18.pdf>

**Anlage zum Schreiben vom 24.06.2009 an:**

**Frau Bundeskanzlerin Dr. rer. nat. Angela Merkel**

**Frau Bundesministerin Prof. Dr. Annette Schavan**

**Herrn Bundesminister Sigmar Gabriel**

**Herrn Bundesminister Dr. Karl-Theodor Freiherr zu Guttenberg**

**Herrn Nds. Ministerpräsident Christian Wulff**

**Herrn Nds. Umweltminister Hans-Heinrich Sander**

**E.ON AG Herrn Vorstandsvorsitzender Dr. Wulf H. Bernotat**

**E.ON-Avacon Herrn Vorstandsvorsitzender Michael Söhlke**

**RWE AG Herrn Vorstandsvorsitzender Dr. Jürgen Großmann**

**RWE AG Leiter Forschung&Entwicklung Herrn Dr. Frank-Detlef Drake**

**Vattenfall Europe AG Herrn Vorstandsvorsitzender Tuomo Hatakka**

**Schreiben der RWE, Essen, vom 09. Juli 2009**

<http://www.rudolf-adolf-dietrich.de/IN007/B-18.2.pdf>

# Wesen der Exergie und Anergie

- § Exergie gewinnt man unmittelbar aus den in der Natur vorhandenen Energiequellen.
- § Diese Energiequellen sind die Wasserkräfte und die natürlichen Brenn- und Spaltstoffe.
- § Die Bereitstellung von Exergie ist kostspielig.
- § Exergie muss daher bezahlt werden.
- § Der Vorrat an Exergie ist in unserem System zwar groß, aber nicht unbegrenzt. Die Exergie ist daher kostbar.
- § Die Exergie wird durch Irreversibilitäten ständig verringert und in Anergie umgewandelt.
- § Anergie steht als innere Energie der Umgebung jederzeit u. an jedem Ort beliebig zur Verfügung; sie ist wertlos/kostenlos.



# Zielsetzung der Energietechnik

- § **Umwandlung von Primärenergie in thermische Energie**
- § **Umwandlung von thermischer Energie in elektrische Energie**
- § **Bereitstellung von thermischer Energie als Heizwärme**

# Exergie der Primärenergieträger

§ Erdgas

$$e_B = 1,04 \cdot H_u$$

§ Heizöl

$$e_B = 1,05 \cdot H_u$$

§ Kohle

$$e_B = 1,04 \cdot H_u$$

§ Koks

$$e_B = 1,03 \cdot H_u$$

§ Kernbrennstoff

$$e_B = 1,00 \cdot E_{\text{Spaltung}}$$

# Arten einer Heizung

- § Durch direkte Verbrennung
- § Mit Dampf aus thermischen Anlagen
- § Mit Strom aus thermischen Anlagen
- § Mit Strom aus Wasserkraft
- § Mit Strom bei Unterstützung durch eine Wärmepumpe
- § Mit Heizwärme aus einem Motor-Generator-Konzept (MGK)

# Arten der Energieumwandlungen

- § **Mit Kondensationsdampfturbinen zur reinen Stromerzeugung**
- § **Mit Kondensationsdampfturbinen zur Stromerzeugung und bei Dampfentnahme**
- § **Mit Gegendruckdampfturbinen zur Stromerzeugung und bei Abdampfverwertung**
- § **Mit Gasturbinen zur Stromerzeugung und bei Abgasverwertung**
- § **Motor-Generator-Konzept zur Strom und bei Wärmeerzeugung**

**Was ist thermische Energie?**

**Was ist innere Energie?**

# Thermische Energie

Bezugspunkt: Absoluter Nullpunkt

$$0 \text{ } ^\circ\text{K (Kelvin)} = -273,15 \text{ } ^\circ\text{Celsius}$$

Energieträger: Wasser/Wasserdampf oder Gas

Thermische Energie enthält einen umwandel- und einen nicht umwandelbaren Anteil Energie.

# 1. Hauptsatz der Thermodynamik

§ Innere Energie und Wärme

§ Existenz einer Zustandsgröße Energie

§ Prinzip von der Erhaltung der Energie

§ Quantitätsaussage

## 2. Hauptsatz der Thermodynamik

§ Jedes System besitzt eine Zustandsgröße Entropie  $S$

§ Die Entropie eines Systems ändert sich durch

- **Wärmetransport** über die Systemgrenze
- **Materialtransport** über die Systemgrenze
- **Entropieerzeugung** infolge Irreversibilitäten

§ Mit dem Wärmestrom geht der Entropiestrom

$$\dot{s}_Q := \frac{\dot{Q}}{T} \quad \dot{s}_Q \geq 0$$

über die Systemgrenze.

§ Qualitätsaussage



# 1. Hauptsatz in allgemeiner Form

§ Bei allen Prozessen bleibt die Summe aus Exergie und Anergie konstant (Erhaltungssatz).

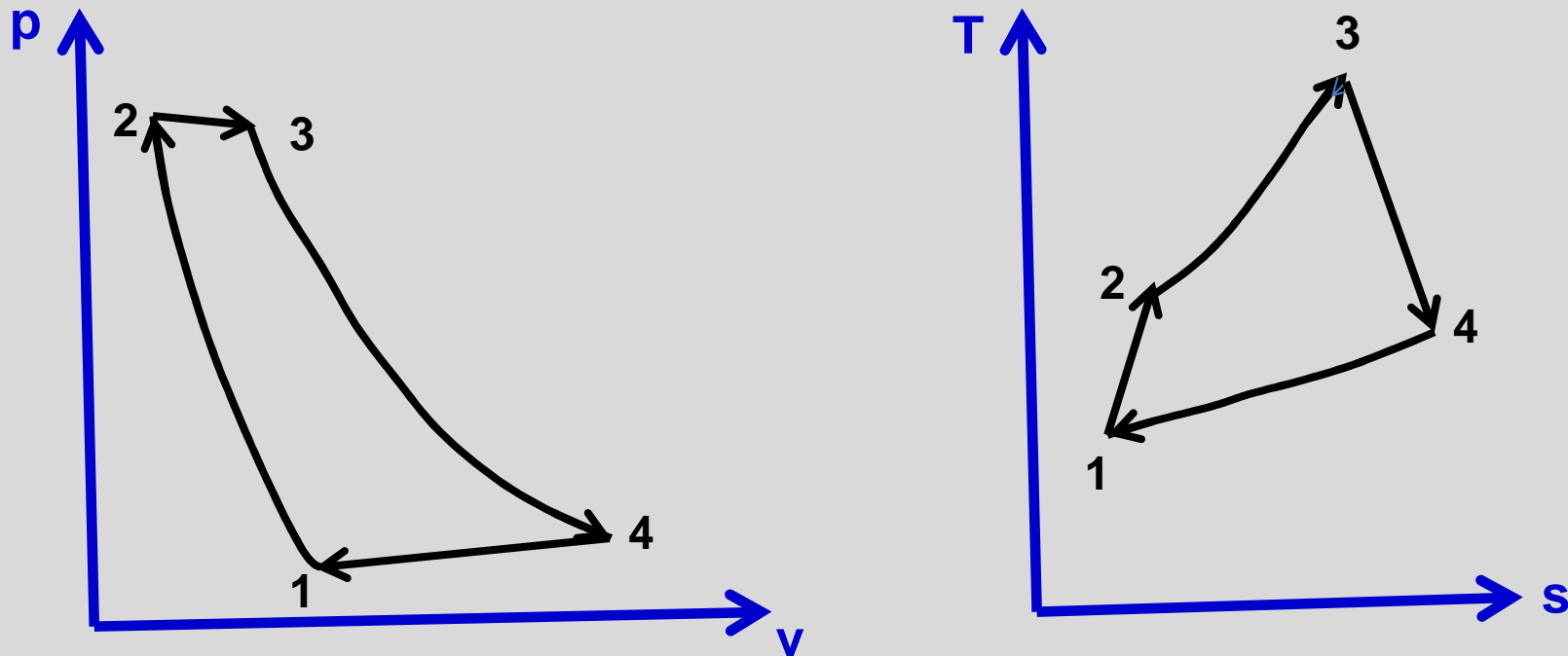
# 2. Hauptsatz in allgemeiner Form

§ Wärme strömt nicht gegen das Temperaturgefälle an.

§ Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden.

§ Bei allen irreversiblen Prozessen wird Exergie in Anergie umgewandelt (Entwertungssatz). Es erfolgt eine Entropiezunahme.

## Rechtsläufiger Kreisprozess im p-v- und T-s-Diagramm



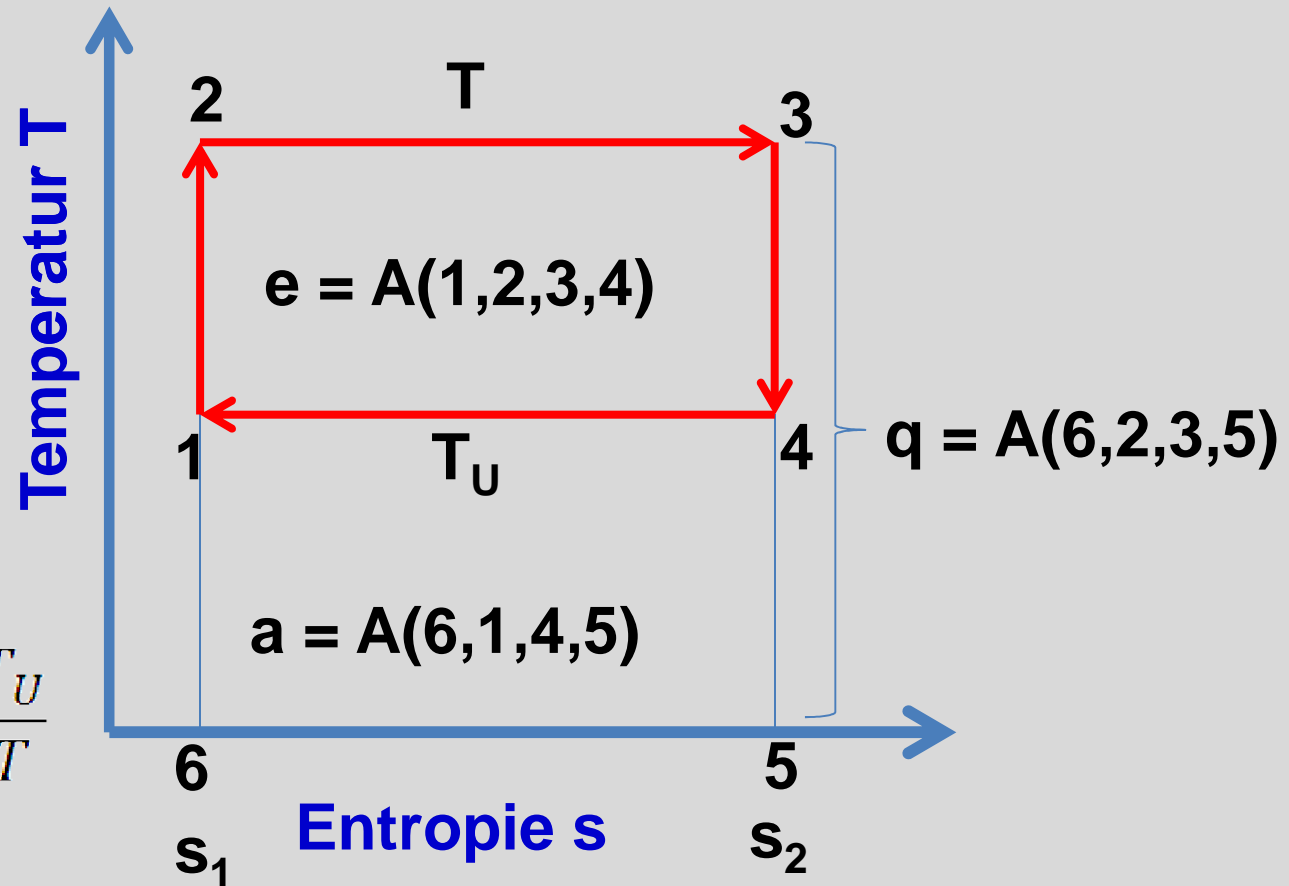
1 – 2 Verdichtung  
2 – 3 Wärmezufuhr

3 – 4 Expansion  
4 – 1 Wärmeabfuhr

# Carnot-Prozess im T-s-Diagramm

- 1-2 rev. ad. Verd.
- 2-3 isoth. Exp. +q
- 3-4 isentr. Exp.
- 4-1 isoth. Verd. -q

$$\eta_c = \frac{e}{q} = 1 - \frac{T_U}{T}$$



# Thermische Energie

$$Q = E + A$$

## Carnot-Faktor

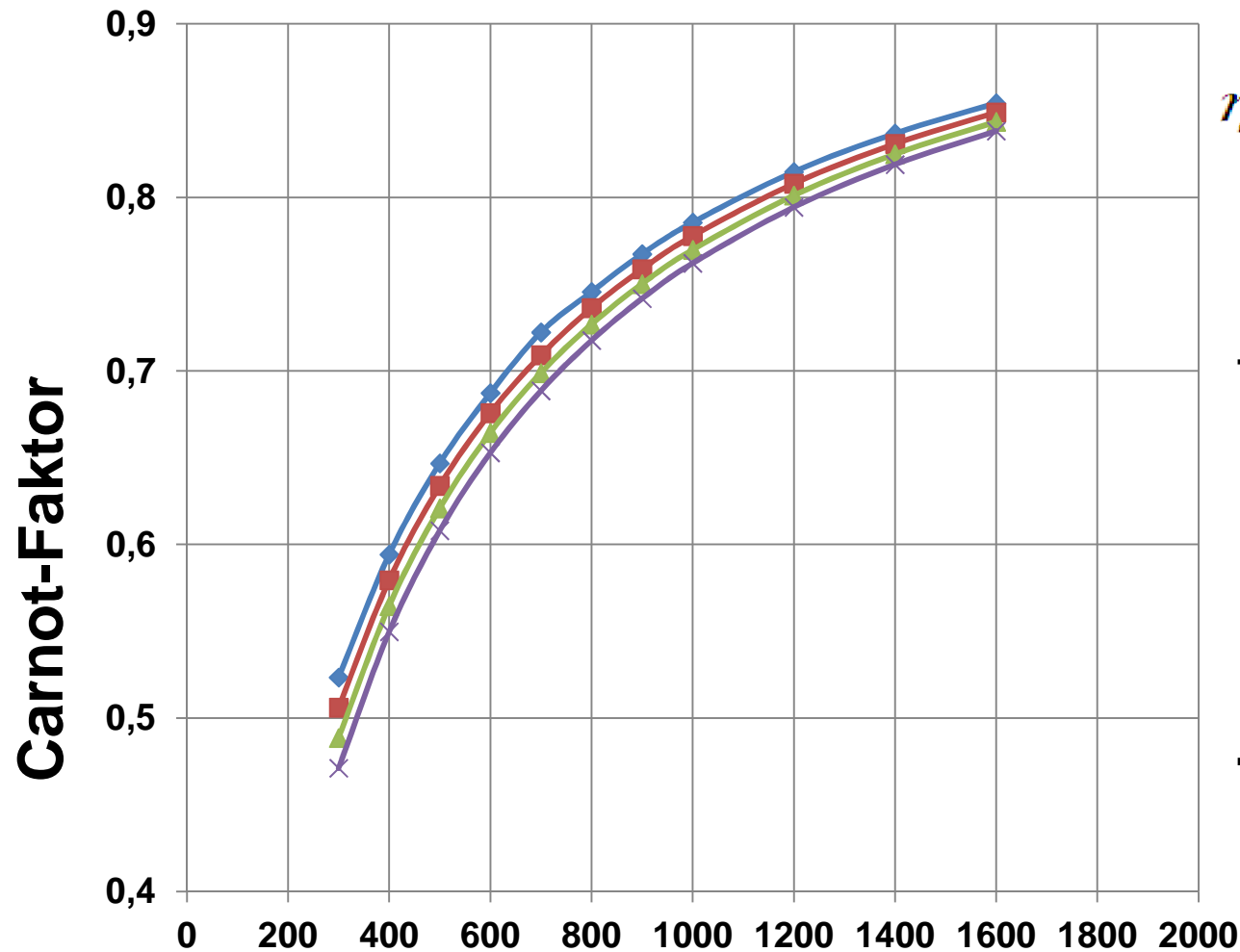
$$\eta_c = 1 - \frac{T_U}{T_Q}$$

## Exergie der Wärme Q

$$E = Q \eta_c = Q \left( 1 - \frac{T_U}{T_Q} \right)$$

## Anergie der Wärme Q

$$A = Q (1 - \eta_c) = Q \left( \frac{T_U}{T_Q} \right)$$



Systemtemperatur  $t_Q$  in Grad Celsius

## Carnot-Faktor als Funktion der Temperaturen

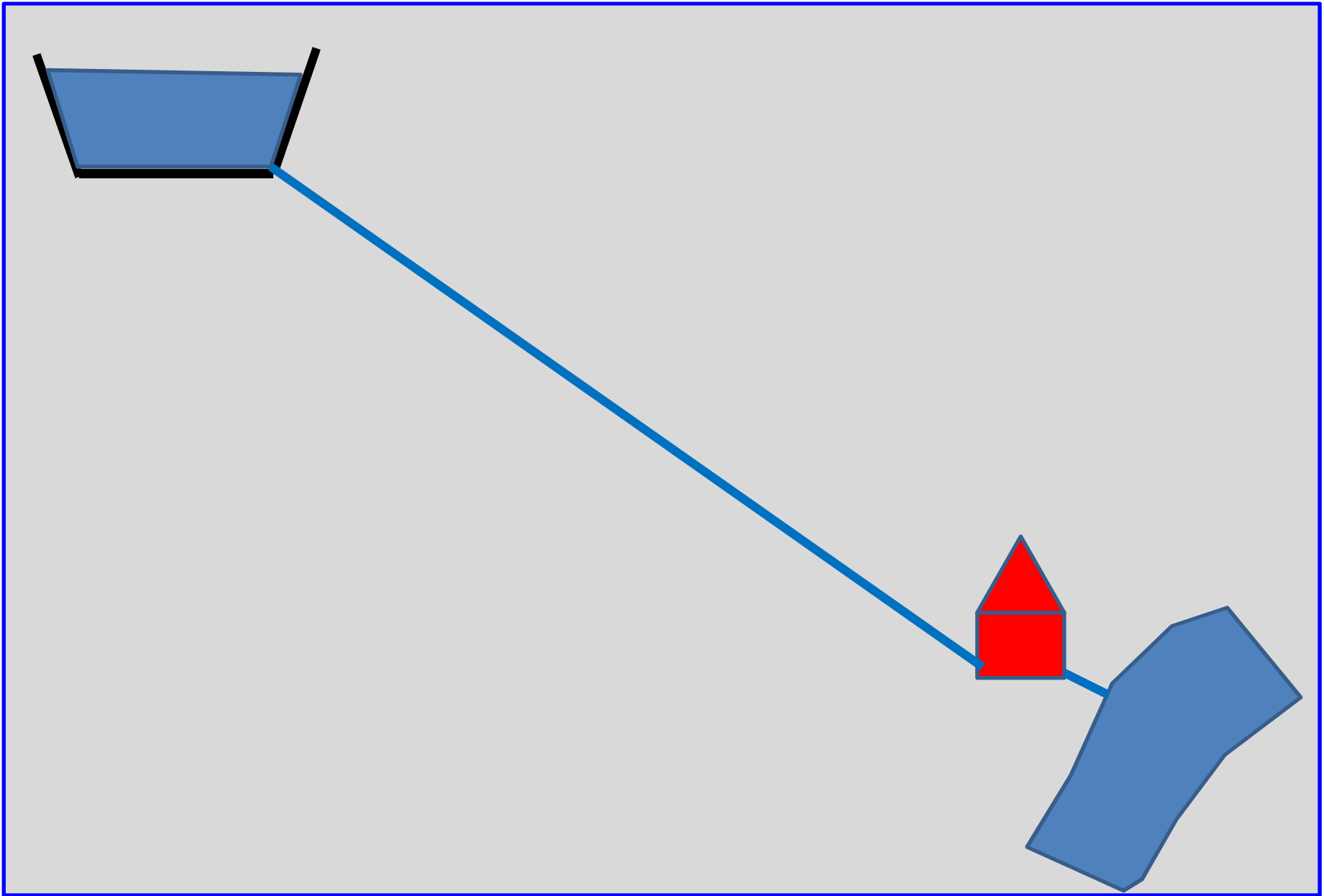
# Spez. Exergie eines Stoffstromes

$$e_{str} = (h - h_U) - T_U (s - s_U) + \frac{1}{2} (c^2 - c_U^2) + g(z - z_U)$$

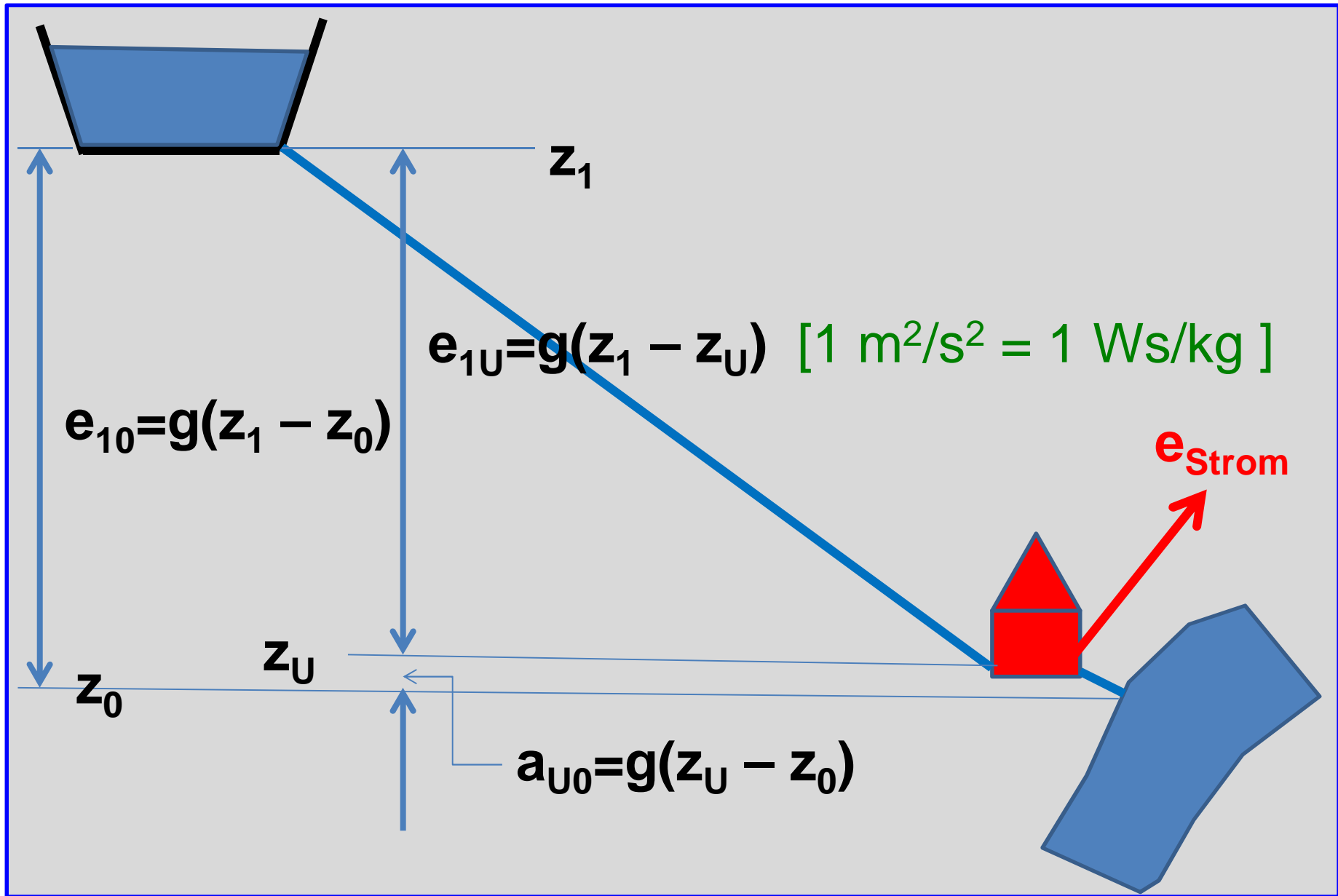
- e** Spezifische Exergie
- h** Enthalpie
- T** absolute Temperatur
- s** Entropie
- c** Geschwindigkeit
- g** Erdbeschleunigung
- z** geodätische Höhe
- U** Index für den Bezugspunkt

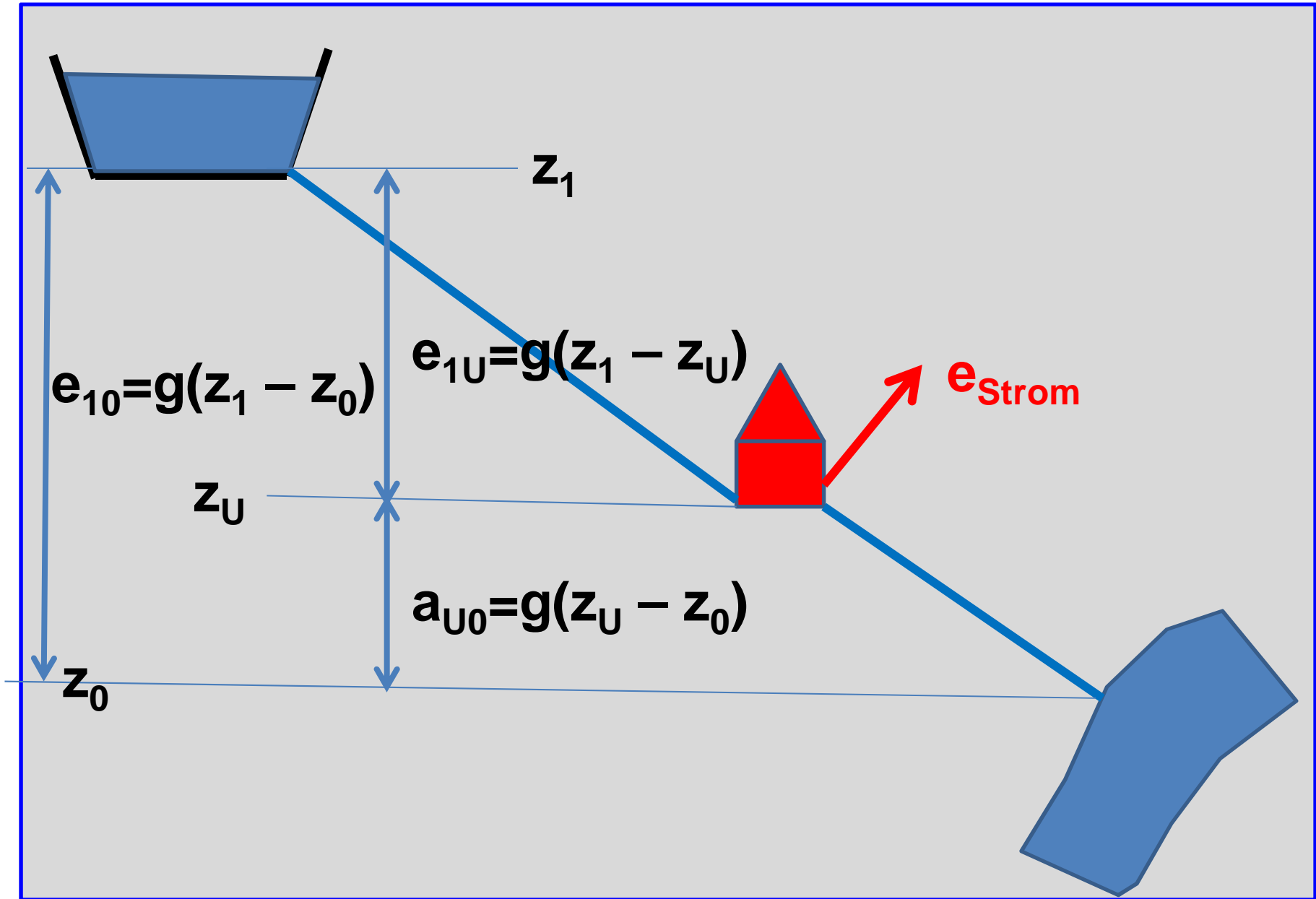
# Spez. Exergie des geodätischen Potenzials

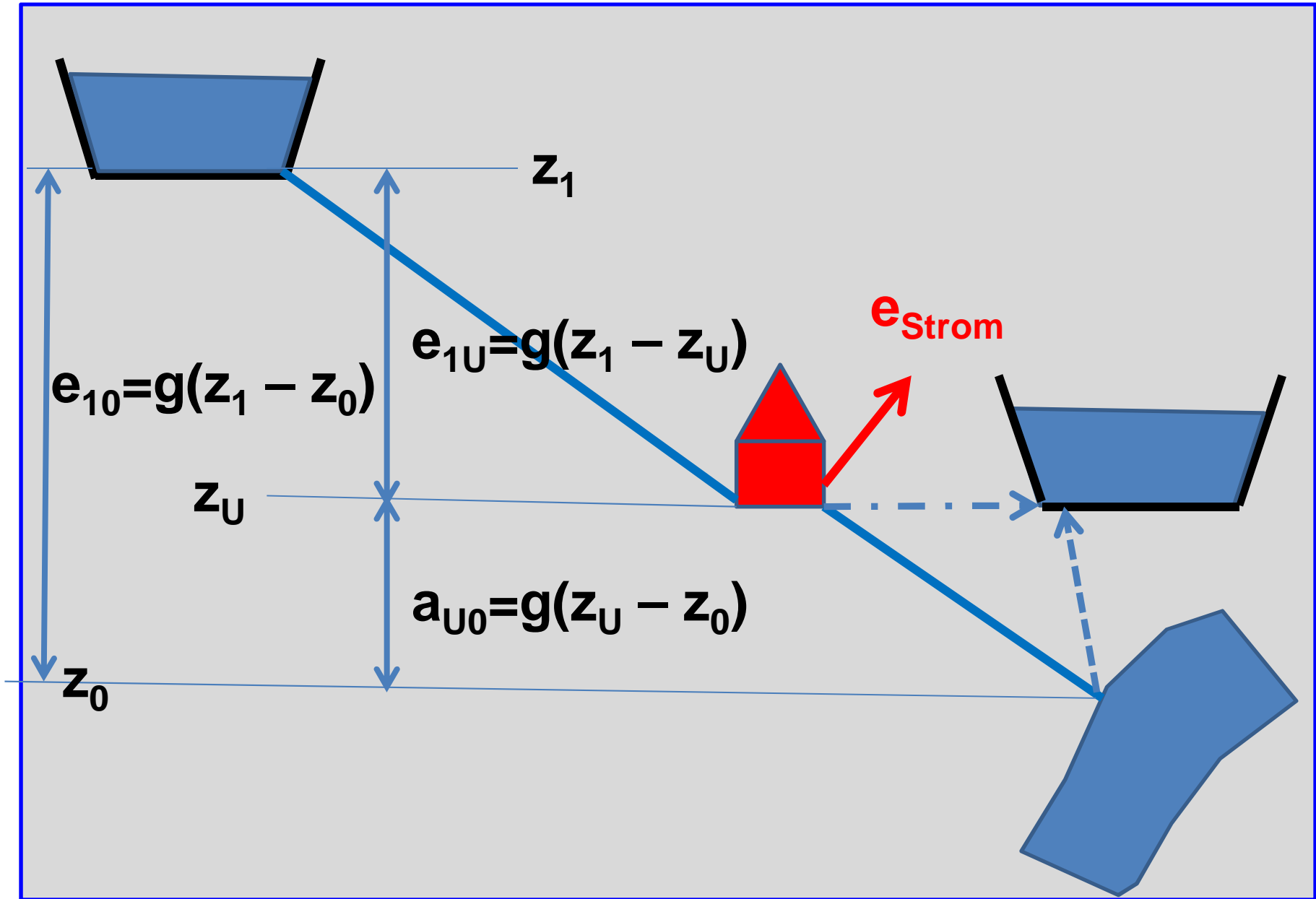
$$e_{geo} = g(z - z_u)$$

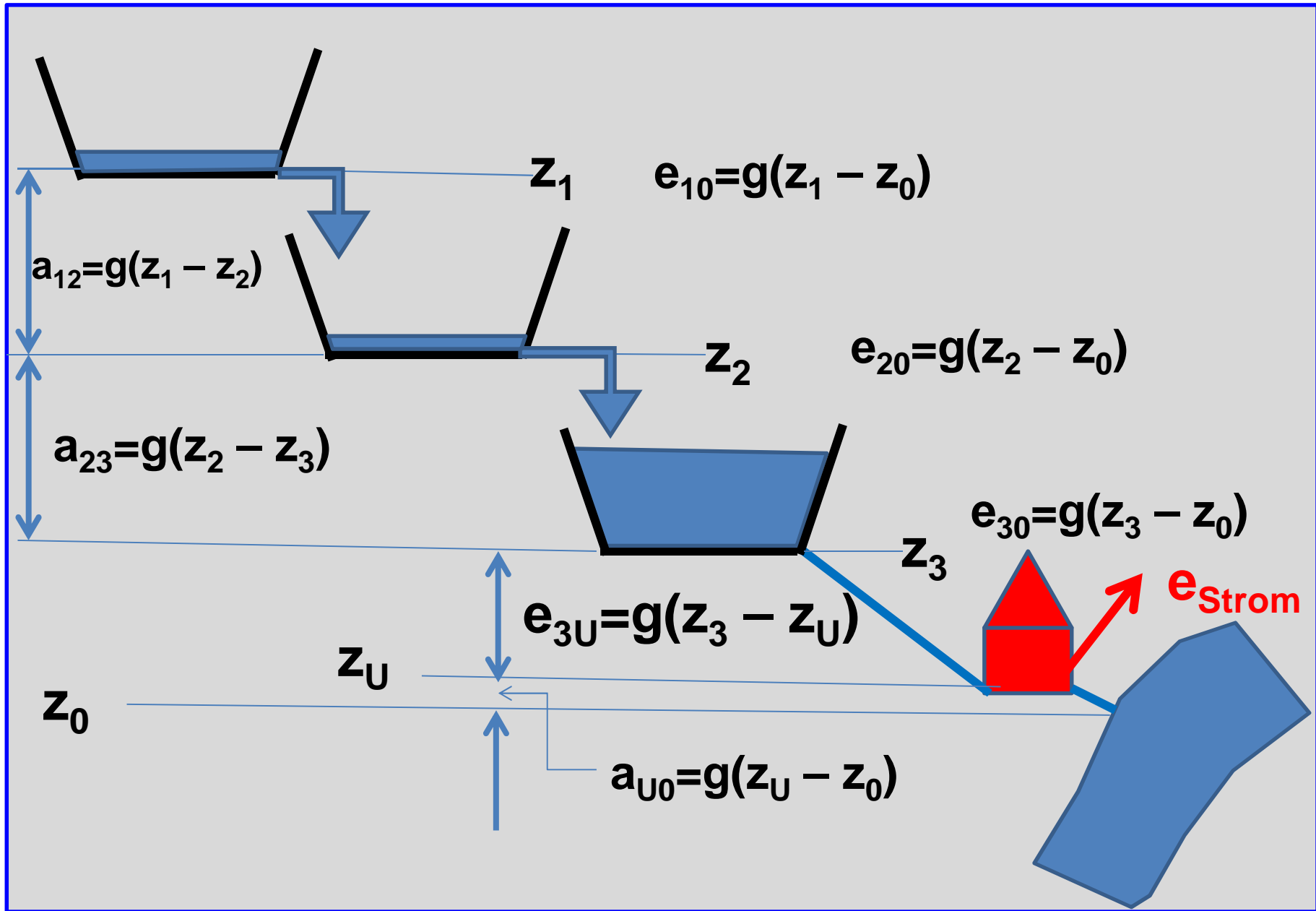




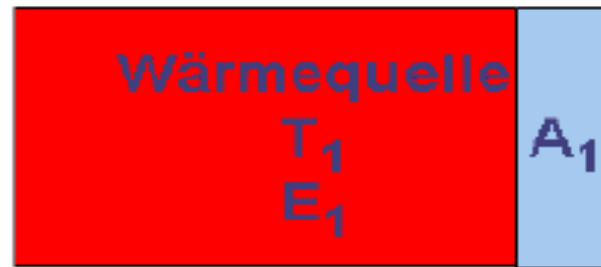








$$Q = E_1 + A_1$$



$$\eta_{c1} = (1 - T_U / T_1)$$

$$E_1 = Q \eta_{c1}$$

$$A_1 = Q (T_U / T_1)$$

$$\Delta A_2 = Q(\eta_{c1} - \eta_{c2})$$



$$Q = E_2 + A_2$$



$$\eta_{c2} = (1 - T_U / T_2)$$

$$E_2 = Q \eta_{c2}$$

$$A_2 = Q (T_U / T_2)$$

$$A_2 = A_1 + \Delta A_2$$

Umgebungstemperatur  $T_U$

**Schema eines Wärmeaustausches zwischen einer Wärmequelle und einer Wärmesenke**

**Energie:** Es gibt keinen Energieverlust, es gibt nur eine Energieumwandlung, es gilt daher der Erhaltungssatz der Energie.

**Exergie:** Exergie verwandelt sich durch irreversible Prozesse in Anergie, wird somit zum Verlust. Es gibt keinen Erhaltungssatz der Exergie.

**Anergie:** Anergie kann nicht in Exergie zurückgewandelt werden.

# **Exergetische Analyse einer Strom- und Wärme-Produktion**

**Fall A) Strom-Wärme-System bei Einleitung der  
Abgase direkt in einen Kamin.**

**Fall B) Strom-Wärme-System bei Einleitung der  
Abgase zuerst in einen Wärmeübertra-  
ger für den Warmwasserkreislauf und  
danach in einen Kamin.**

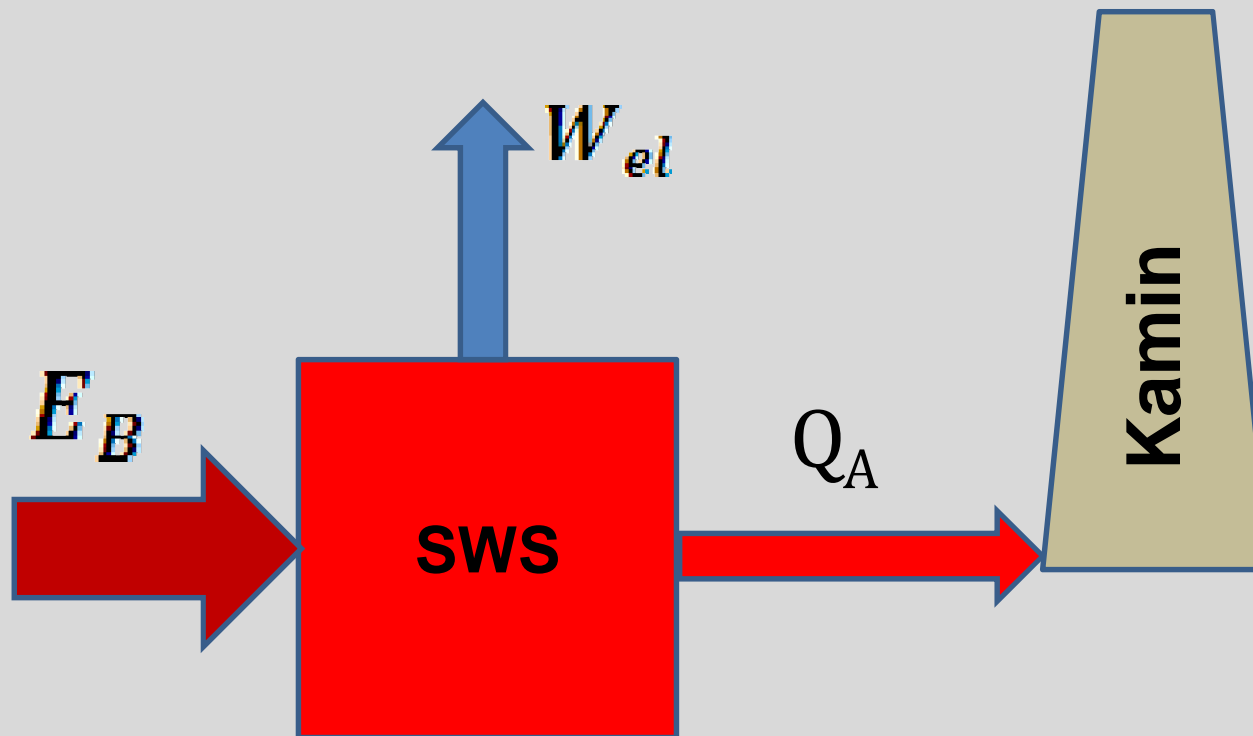
# Charakteristische Daten einer Erdgas-Kraft-Wärme-Anlage

Zugeführte Leistung	18,5 kW
Elektrische Nutzleistung	5,0 kW
Verbrennungstemperatur	520 °C
Abgastemperatur	150 °C
Umgebungstemperatur	0 °C
Vorlauftemperatur	73 °C
Raumtemperatur	20 °C

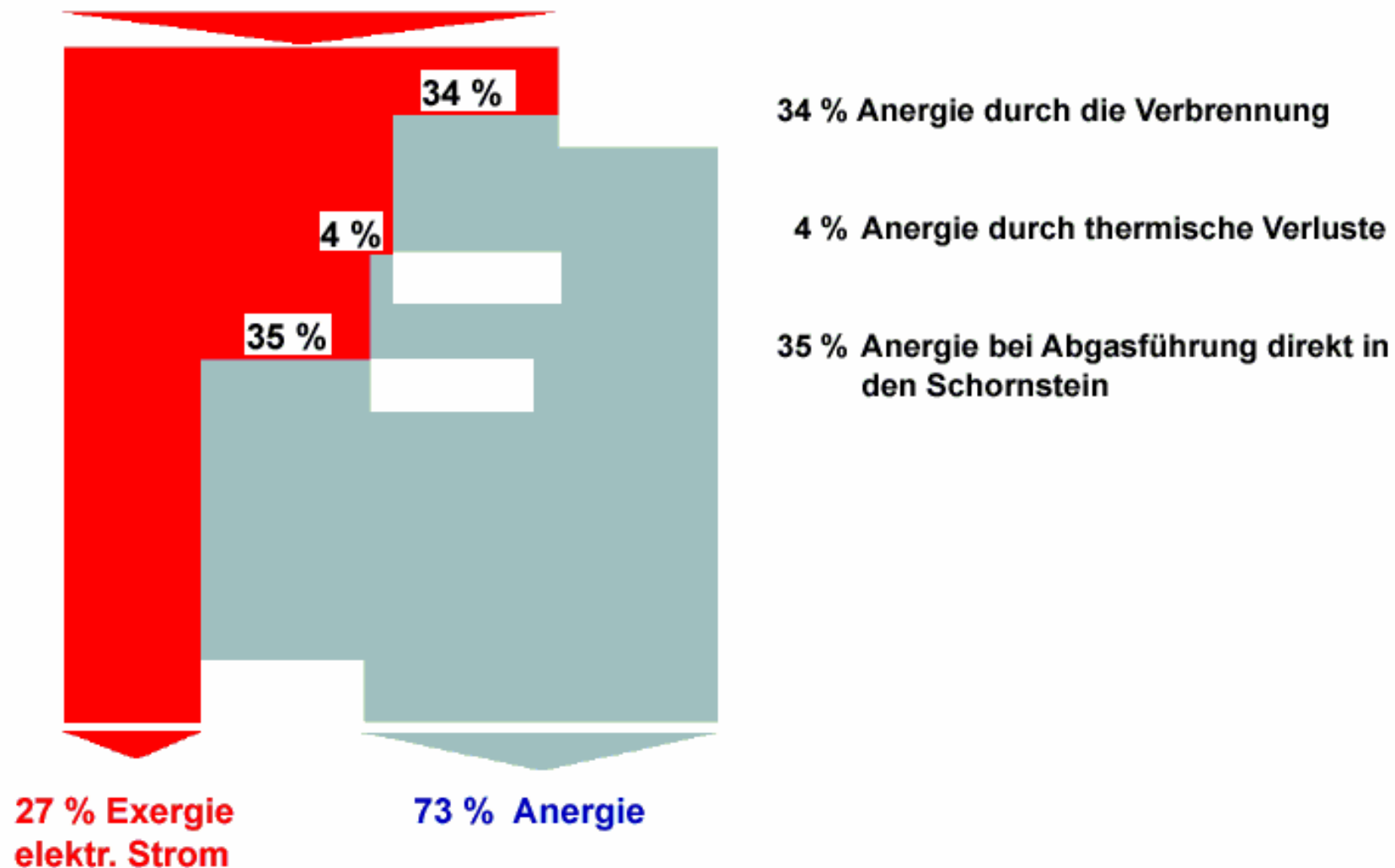


# Schema eines Strom-Wärme-Systems

Einleitung der Abgase direkt in einen Kamin



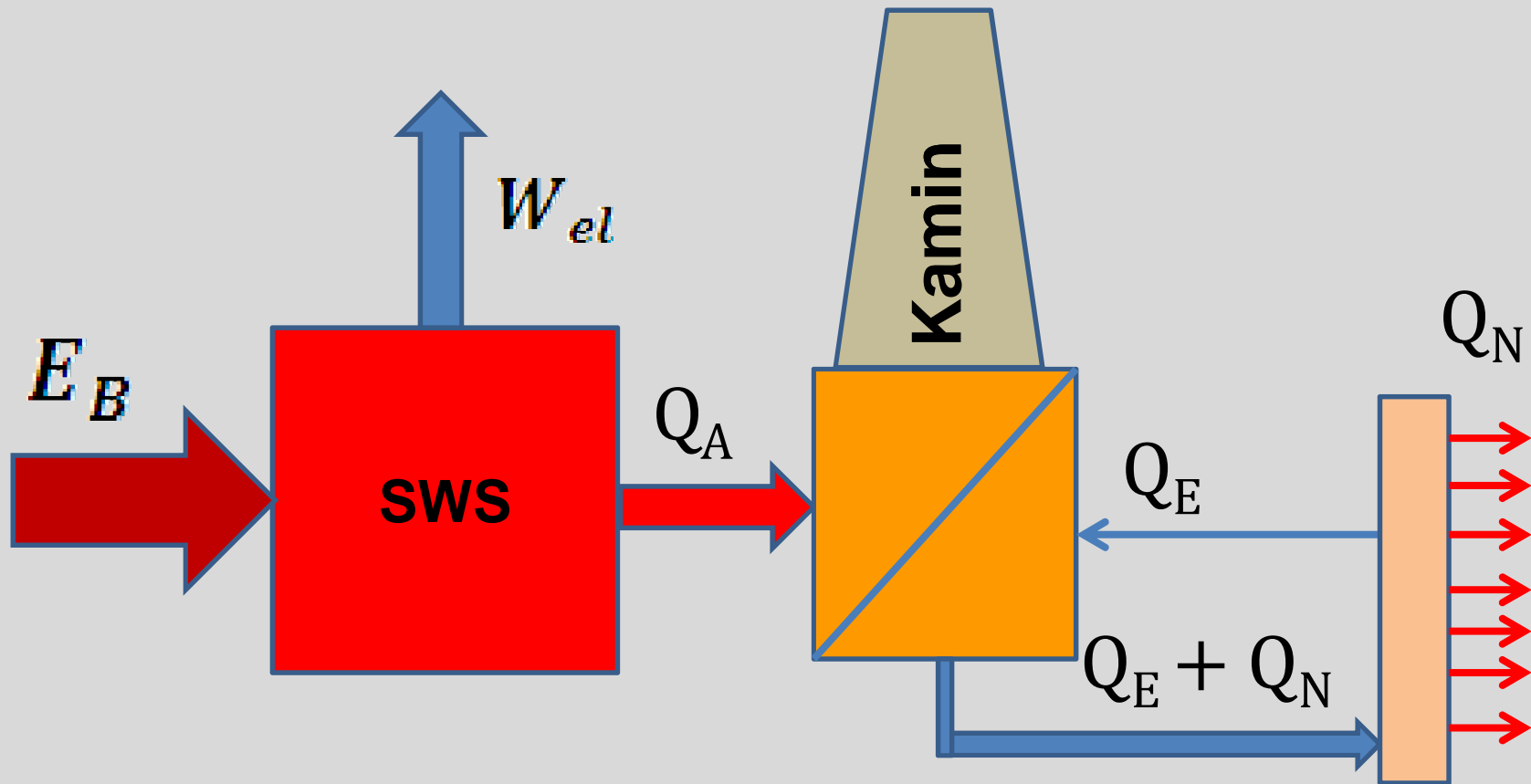
**100 % Exergie des Erdgases**



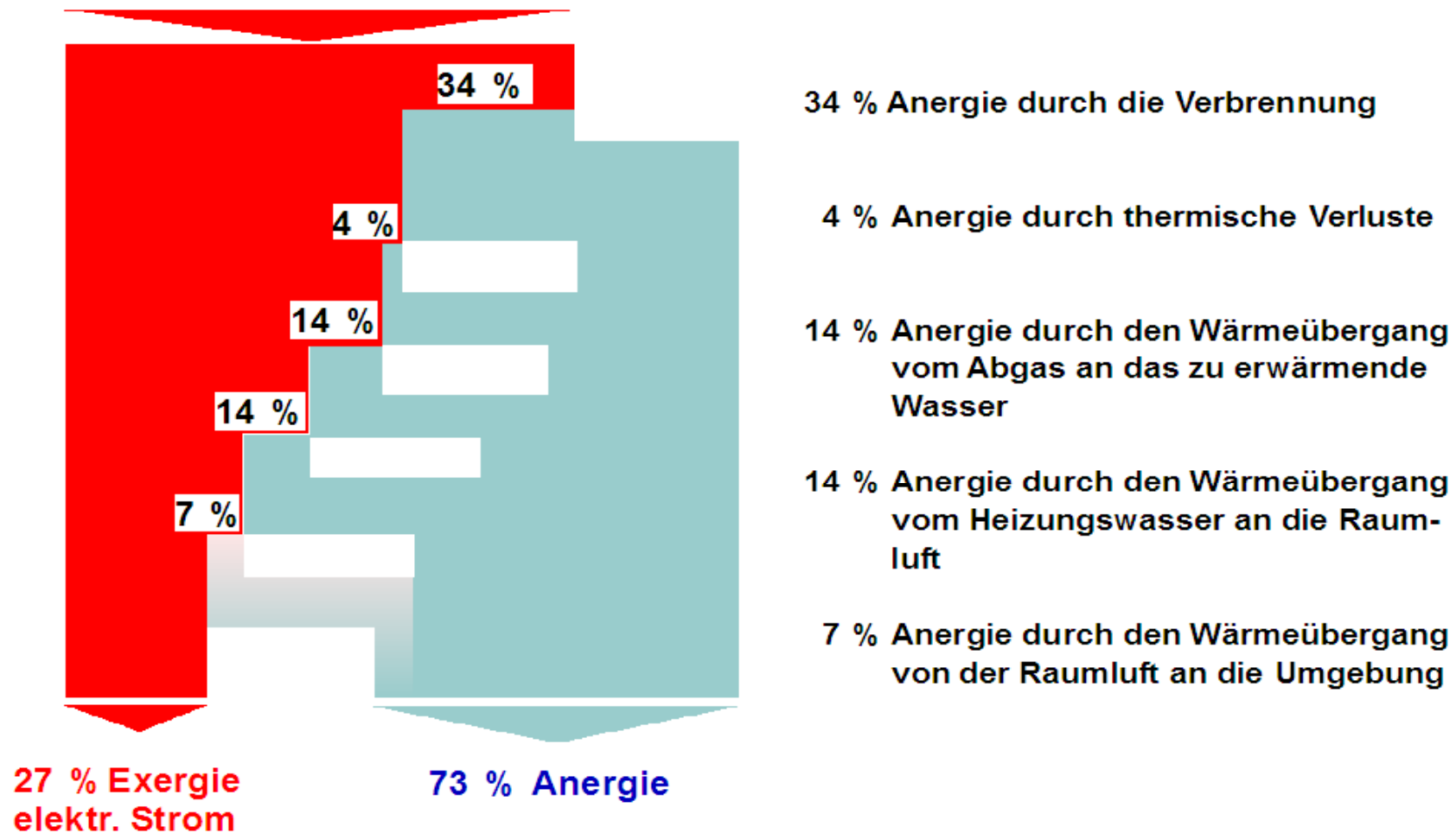
**Exergie-Anergie-Flussbild bei einer Strom-Wärme-Kopplung bei direkter Einleitung des Abgases in den Schornstein**

# Schema eines Strom-Wärme-Systems

Einleitung der Abgase in einen Wärmeübertrager



100 % Exergie des Erdgases



**Exergie-Anergie-Flussbild einer Strom-Wärme-Kopplung bei einer Einleitung des Abgases in einen Wärmeaustauscher zur Erwärmung des Wassers für die Heizung**

# Bewertung (1)

Um  $1000 \text{ MW}_{\text{el}}$  mit der als Beispiel gewählten dezentralen Strom-Wärme-Anlage bereitzustellen, wären 200 000 dieser Anlagen mit insgesamt  $3704 \text{ MW}_{\text{th}}$  erforderlich.

Würden die  $1000 \text{ MW}_{\text{el}}$  jedoch in einem Großkraftwerk und somit mit einem höheren exergetischen Gütegrad von 43 % bereitgestellt, so würden hierzu nur  $2326 \text{ MW}_{\text{th}}$ , d. h.  $1378 \text{ MW}_{\text{th}}$  weniger, benötigt.

Oder bei  $3704 \text{ MW}_{\text{th}}$  stünden  $593 \text{ MW}_{\text{el}}$  mehr zur Verfügung

## Bewertung (2)

Bei einem unteren Heizwert des Erdgases von ca.  $11 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}$  würden zur Erzeugung der gleichen Menge kWh in dem Großkraftwerk ca. 1,1 Millionen Tonnen Erdgas pro Jahr weniger benötigt.

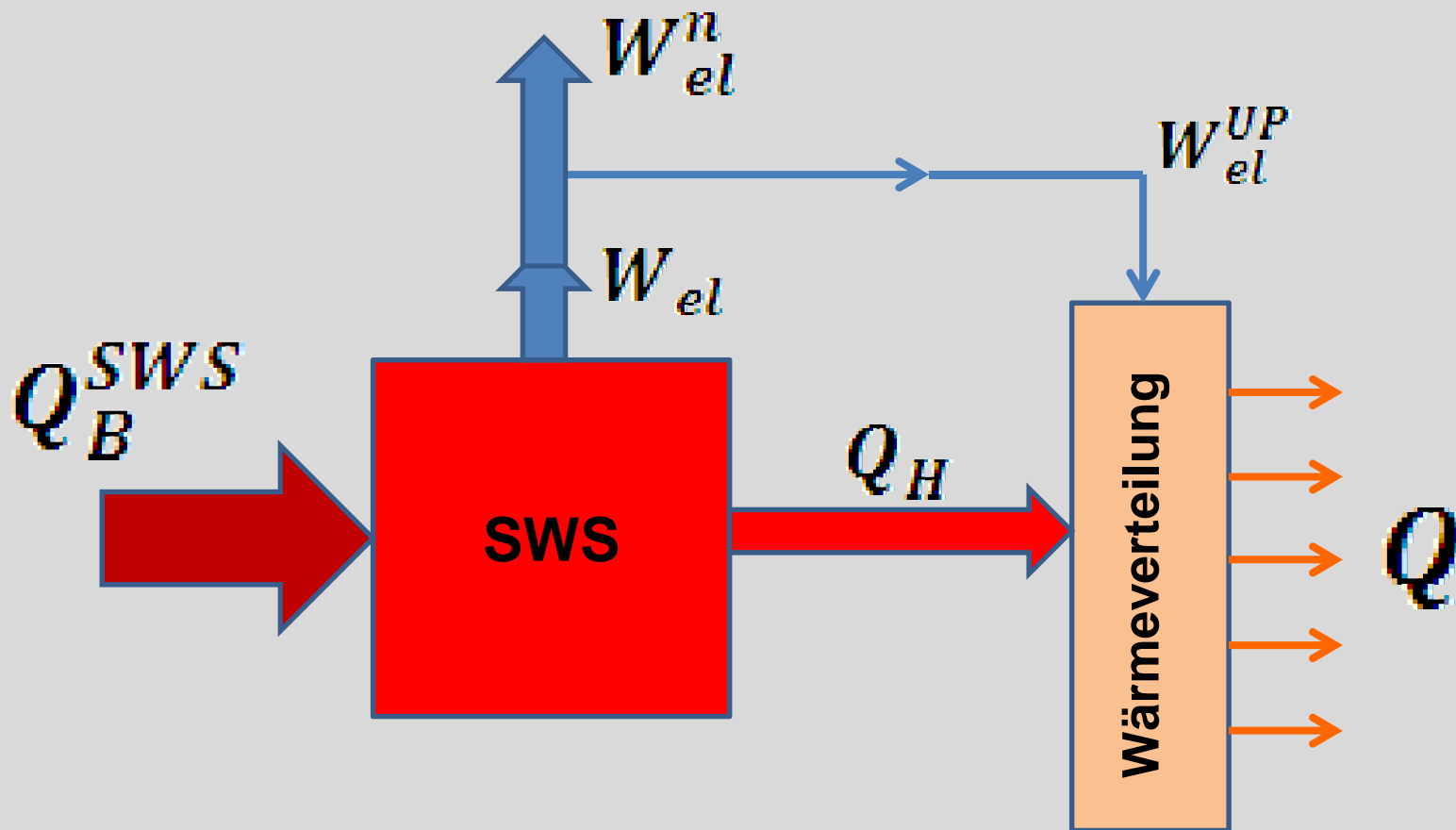
Die natürlichen Erdgas-Ressourcen würden geschont und es würden ca. 2,4 Millionen Tonnen  $\text{CO}_2$  pro Jahr weniger produziert.

# **Energetische Analyse einer Strom- und Wärme-Produktion**

**Fall A) Der Strom wird in einem Kraftwerk (KW)  
und die Wärme wird in einer  
Heizungsanlage (HA) erzeugt.**

**Fall B) Der Strom und die Wärme werden in  
einem Strom-Wärme-System (SWS)  
erzeugt.**

# Schema eines Strom-Wärme-Systems





# Charakteristische Daten für ein Erdgas-Strom-Wärme-System

**Leistungsaufnahme**

$$Q_B^{SWS} = 20,5 \text{ kW}$$

**Heizleistung**

$$Q_H = 12,5 \text{ kW}$$

**Elektrische Leistung**

$$W_{el} = 5,5 \text{ kW}$$

**Eigenbedarf im Betrieb**

$$W_{el}^{EB} = 0,12 \text{ kW}$$

# Kennzahlen für das Strom-Wärme-System

## Energetischer Nutzungsfaktor $\omega$

$$\omega := \frac{W_{el} + Q_H}{Q_B^{SWS}} = \frac{5,5 + 12,5}{20,5} = 0,878$$

## Energetische Stromkennzahl $\sigma$

$$\sigma := \frac{W_{el}}{Q_H} = \frac{5,5}{12,5} = 0,44$$

## Energetische Stromausbeute $\beta$

$$\beta := \frac{W_{el}}{Q_B^{SWS}} = \frac{5,5}{20,5} = 0,2683$$

## Energetische Eigenbedarfszahl $\alpha$

$$\alpha := \frac{W_{el}^{UP}}{Q_H} = \frac{0,12}{12,5} = 0,0096$$

# Kennzahlen bei getrennter Strom- und Wärme-Erzeugung

Energetischer Wirkungsgrad eines Kraftwerkes

$$\bar{\eta}_{\text{KW}} = 0,45$$

Energetischer Verteilungswirkungsgrad

$$\eta_{\text{VW}} := \frac{Q}{Q_{\text{H}}} = 0,90$$

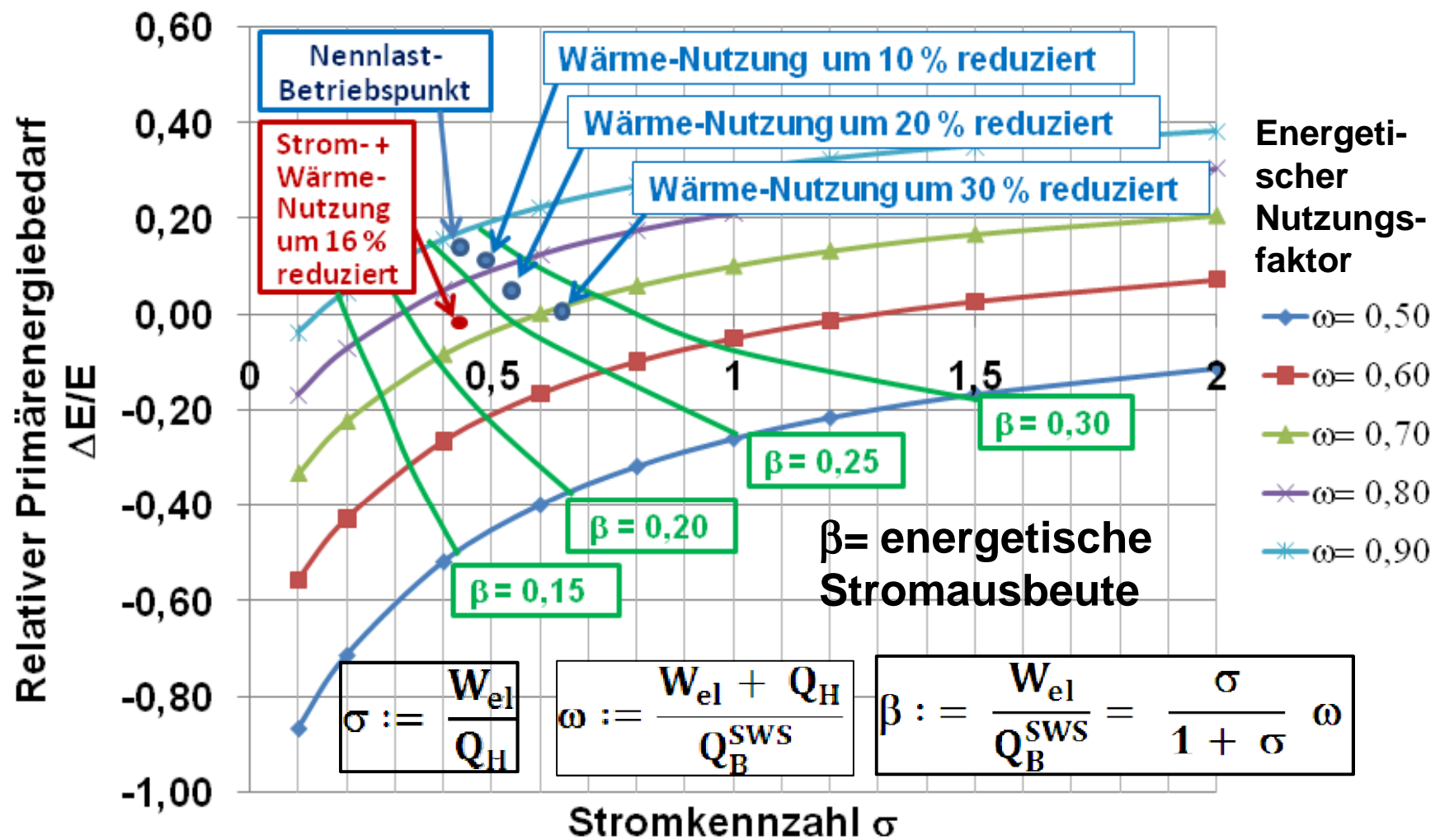
Energetische Heizzahl

$$\xi^Q := \frac{Q}{Q_{\text{B}}^{\text{HA}}} = 0,92$$

## Relativer Primärenergiebedarf

$$\frac{E_B^{KW+HA} - E_B^{SWS}}{E_B^{KW+HA}} = \frac{\Delta E_B}{E_B^{KW+HA}} = 1 - \frac{1 + \sigma}{\omega} \frac{1}{\frac{\sigma - \alpha}{\bar{\eta}_{KW}} + \frac{\eta_{VW}}{\xi^Q}}$$

$$= 1 - \frac{1 + 0,44}{0,878} \frac{1}{\frac{0,44 - 0,0096}{0,45} + \frac{0,9}{0,92}} = 0,1523$$



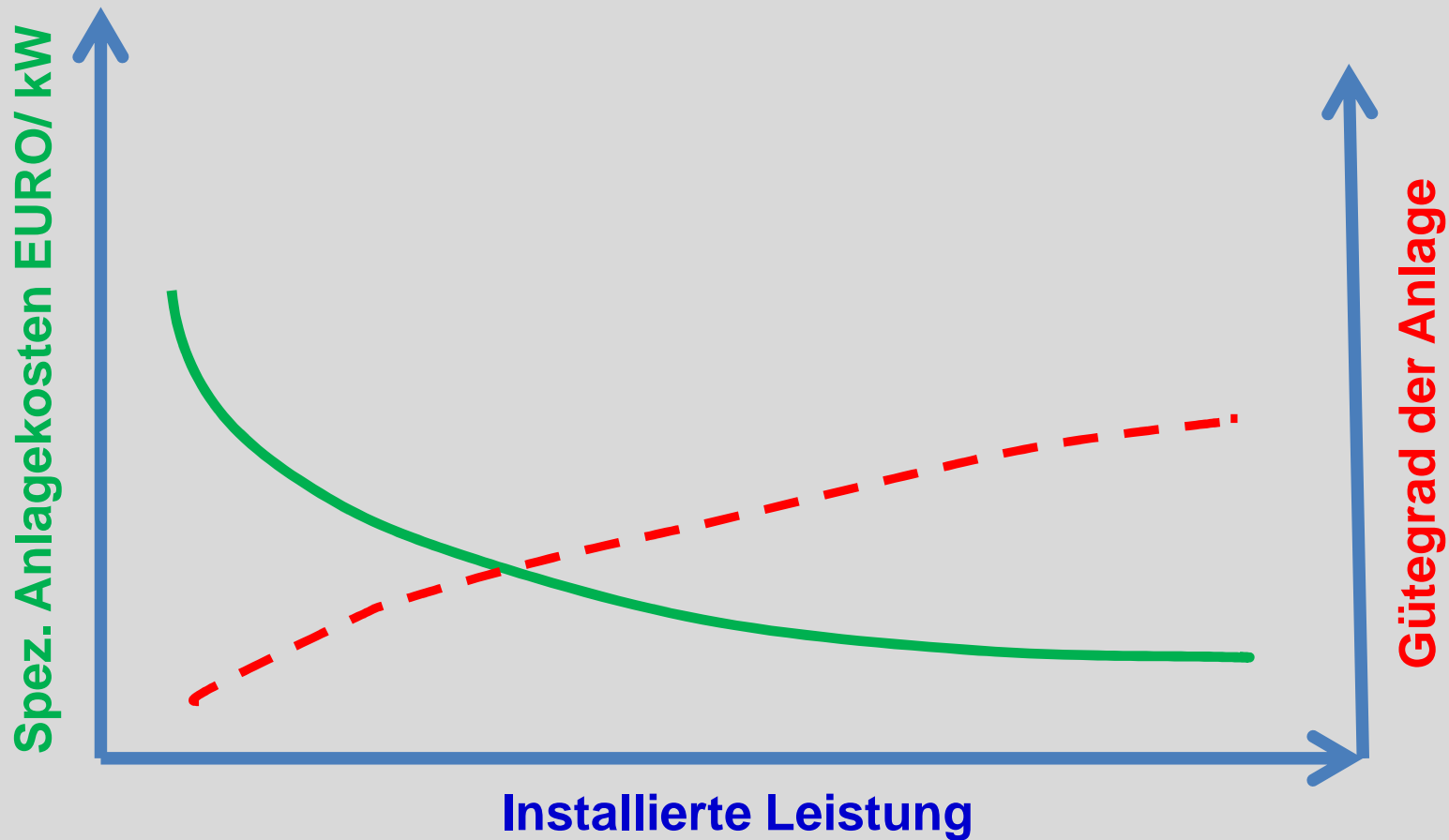
**Bild 1: Relativer Primärenergiebedarf**

## **Bewertung (3)**

**Die vorliegende Betrachtung zeigt, dass ein Strom-Wärme-System nur innerhalb eines kleinen Bereiches um den Nennlast-Betriebspunkt eine Primärenergieersparnis ausweist.**

**Da der Bedarf an Heizwärme während eines Jahres auch über längere Zeiträume starken Schwankungen unterworfen ist, ist die Zeit, während der das Strom-Wärme-System im Nennlast-Betriebspunkt arbeitet, sehr begrenzt.**

# Abhängigkeiten der spezifischen Anlagekosten und des Gütegrads

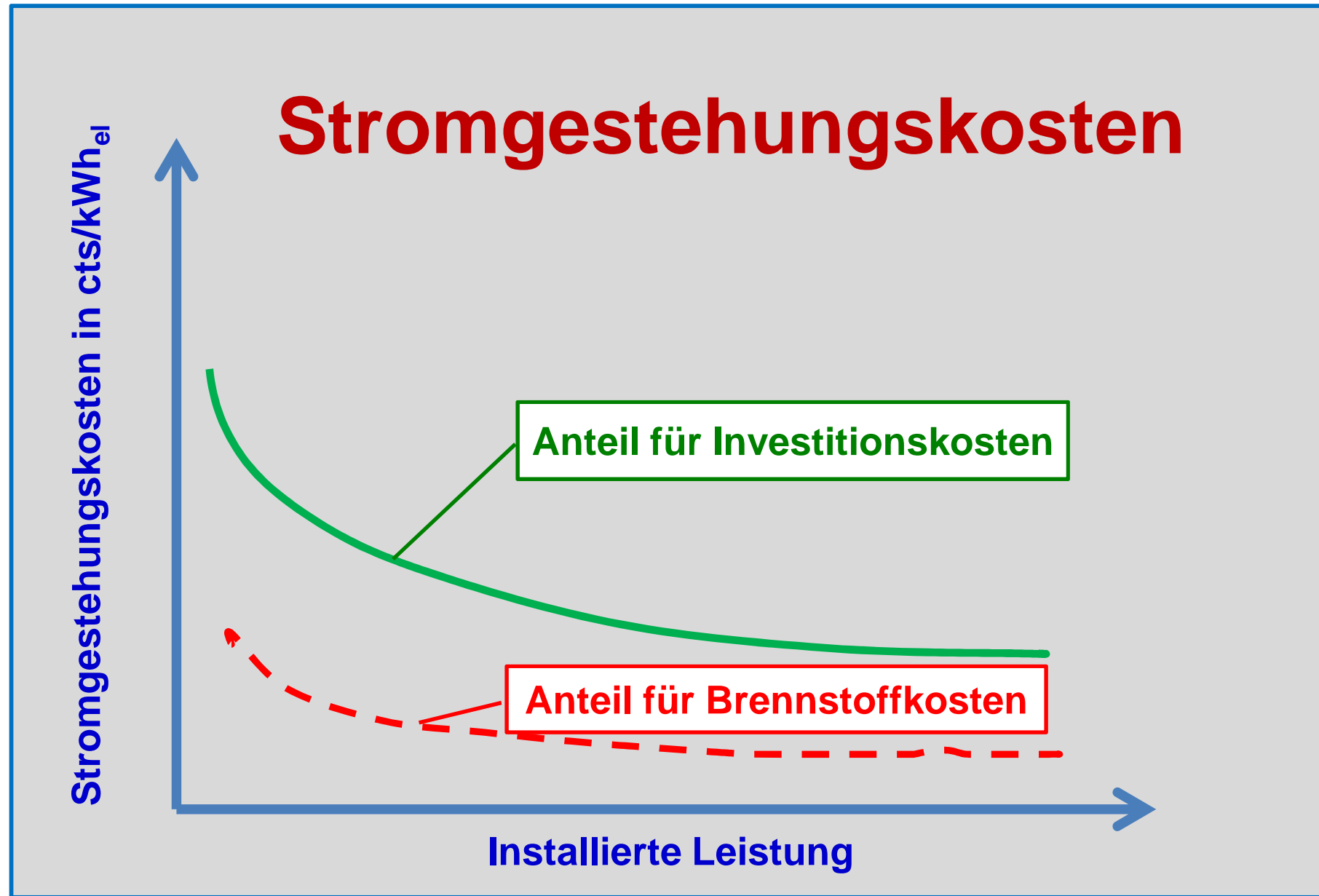


# Stromgestehungskosten

$$k_S \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{kWh}} \right] = \frac{\alpha [1/a]}{T_{VL} [h/a]} k_{Anlage} \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{kW}} \right] + \frac{1}{\eta_{ex}} p_{Ex,Br} \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{kWh}} \right]$$



# Stromgestehungskosten



# Stromgestehungskosten



## Abschl. Bemerkungen (1)

Die relative Primärenergieeinsparung darf nicht als alleiniger Maßstab für die Bewertung eines Strom-Wärme-Systems gewählt werden.

Bei allen Bestrebungen müssen wieder die minimalen Gestehungskosten für eine  $\text{kWh}_{\text{el}}$  und für eine  $\text{kWh}_{\text{th}}$  als Zielfunktion verwendet werden, um zu volkswirtschaftlichen und ressourcenschonenden Lösungen zu kommen.

## Abschl. Bemerkungen (2)

Der Schlüssel zu einer effizienteren Ausnutzung der Brennstoffe liegt daher nicht in der Dezentralisierung der Stromerzeugung, da sie zu hohen spezifischen Anlagekosten (EURO/kW) bei geringen exergetischen Gütegraden und somit zu hohen Stromgestehungskosten und Wärmekosten führt.

Eine effiziente Ausnutzung der Brennstoffe kann nur durch eine Zentralisierung der Stromerzeugung mit großen Leistungseinheiten bei geringen spezifischen Anlagekosten und bei möglichst hohen exergetischen Gütegraden erreicht werden.

**Ich danke Ihnen für Ihr Interesse  
und für Ihre Aufmerksamkeit**