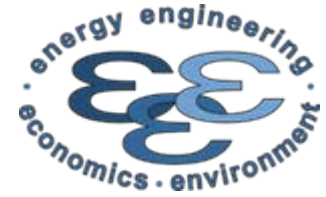




**Technische Universität Berlin**

---

**Institut für Energietechnik**



# **Exergie und Ökonomie**

## **Optimierungsstrategien von Energiesystemen**

**George Tsatsaronis**

BMW LowEx Symposium • Kassel • October 28 2009

---

[tsatsaronis@iet.tu-berlin.de](mailto:tsatsaronis@iet.tu-berlin.de)  
[www.energietechnik.tu-berlin.de](http://www.energietechnik.tu-berlin.de)

# Ausgangspunkt

---

Um den *thermodynamischen Wirkungsgrad* und die *Kosteneffektivität* einer Energieumwandlungsanlage zu erhöhen und gleichzeitig die mit der Anlage verbundenen *Umweltbelastungen* zu reduzieren, ist das Verständnis darüber, wie *thermodynamische Verluste*, *Kosten* und *Umweltbelastungen* im Prozess entstehen und wie sie sich gegenseitig beeinflussen eine wesentliche Voraussetzung. Die Zielsetzung liegt in einer einheitlichen, konsistenten, *Integrierten Bewertung eines energietechnischen Systems* unter *thermodynamischen*, *ökonomischen* und *ökologischen Gesichtspunkten*.

# Fragen

---

Beim Entwurf und Betrieb einer Energieumwandlungsanlage sind vom Prozessingenieur u.a. folgende Fragen zu beantworten:

- **Wo treten reale thermodynamische Verluste im Prozess auf? Wie groß sind diese Verluste und wodurch werden sie verursacht? (*A.: Exergieanalyse*)**
- **Durch welche Parameteränderungen oder Prozessmodifikationen kann der Wirkungsgrad des gesamten Prozesses angehoben werden? (*A.: Exergieanalyse, aber eine konventionelle Analyse reicht nicht aus*)**

# Fragen (Fortsetzung)

---

- Wie groß sind der Gesamtinvestitionsbedarf und die Anschaffungskosten der wichtigsten Anlagenkomponenten? (*A.: Kostenanalyse*)
- Wie groß sind die Kosten, die mit den thermodynamischen Verlusten verbunden sind? (*A.: Exergoökonomische Analyse*)

# Exergieanalyse

---

In Rahmen einer Exergieanalyse wird folgendes berechnet:

- die Exergie (  $E$  ) eines jeden Energie- und Stoffstromes innerhalb der betrachteten Anlage,
- die Exergievernichtung innerhalb jeder Anlagenkomponente und innerhalb der Gesamtanlage und
- der exergetische Wirkungsgrad jeder Anlagenkomponente.

# Exergetische Kenngrößen: $E_P$ und $E_F$

---

*Exergetischer Nutzen:*  $\dot{E}_P$

Erwünschtes Produkt, beschrieben durch die zugehörige Größe der Exergie, das von der betrachteten Anlage (oder von der  $k$ -ten Anlagenkomponente) bereitgestellt wird.

*Exergetischer Aufwand:*  $\dot{E}_F$

Exergieeinsatz, der aufgewendet wird, um den exergetischen Nutzen bereitzustellen.

# Exergetische Kenngrößen: $E_D$ und $E_L$

---

## Exergievernichtung: $\dot{E}_D$

Exergie, die aufgrund von Irreversibilitäten innerhalb der betrachteten Anlage (oder der  $k$ -ten Anlagenkomponente) vernichtet wird.

## Exergieverlust: $\dot{E}_L$

Exergietransport an die Umgebung. Der zugehörige Exergiestrom wird weder in der betrachteten Anlage noch in einem anderen System weiter genutzt.

## Exergiebilanz: $\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D (+ \dot{E}_L)$

# Exergetische Kenngrößen: $\varepsilon$ und $y_{D,k}$

**Exergetischer Wirkungsgrad  $\varepsilon$  :**

Verhältnis von exergetischem Nutzen zu exergetischem Aufwand

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,k}}$$

**Exergievernichtungsquotient** der  $k$ -ten Anlagenkomponente:

$$y_{D,k} = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,tot}}$$

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\dot{E}_{P,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,tot} + \dot{E}_{L,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} = 1 - \sum_k y_{D,k} - \frac{\dot{E}_{L,tot}}{\dot{E}_{F,tot}}$$

# Schlussfolgerung: Konventionelle Exergieanalyse

---

Mit Hilfe einer exergiebasierten thermodynamischen Analyse können *die realen thermodynamischen Verluste* in einer energietechnischen Anlage berechnet und ihre Ursachen aufgezeigt werden.

Die realen thermodynamischen Verluste beinhalten die *Exergievernichtung* aufgrund von Irreversibilitäten innerhalb der Systemgrenzen und den *Exergieverlust* durch unerwünschten Exergietransport an die Umgebung.

# Wirtschaftlichkeitsanalyse

---

Eine **Wirtschaftlichkeitsanalyse** sollte die gesamte Lebensdauer einer Energieumwandlungsanlage umfassen. Dabei müssen alle zugehörigen Kosten berücksichtigt werden. Diese beinhalten Abschreibungen, Zinszahlungen, Steuern und Versicherungen, Brennstoffkosten und Betriebs- und Wartungskosten. Im Rahmen der **Wirtschaftlichkeitsanalyse** werden nivellierte jährliche Kosten berechnet und damit ein für die gesamte wirtschaftliche Nutzungsdauer repräsentatives Jahr beschrieben.

# Exergoökonomische Methode - 1

---

Bei der Anwendung der *exergoökonomischen Methode* wird eine optimale Abstimmung der notwendigen Investitionskosten (kapitalgebundenen Kosten) mit den sich daraus ergebenden zugehörigen Brennstoffkosten gesucht. Die Zielsetzung der *exergoökonomische Optimierung* liegt in der Minimierung der Produktkosten, die die Summe aus kapitalgebundenen Kosten, Brennstoffkosten und Betriebs- und Wartungskosten beinhalten.

## Exergoökonomische Methode - 2

---

Die **exergoökonomische Methode** verbindet eine **Exergieanalyse** mit **ökonomischen Prinzipien** und stellt einem Ingenieur dadurch zusätzliche Informationen zur Verfügung, die aus einer konventionellen Energieanalyse oder Exergieanalyse und einer ökonomischen Bewertung nicht gewonnen werden können. Diese Informationen sind jedoch für den Entwurf und den Betrieb einer **kosteneffektiven** Anlage entscheidend.

Die **exergoökonomische Methode** kann als exergieunterstützte Kostenreduzierung verstanden werden.

# Exergoökonomische Methode - 3

---

Die **exergoökonomische Methode** basiert auf zwei wichtigen Prinzipien, die die Verknüpfung von **Thermodynamik** und **Wirtschaftlichkeit** repräsentieren.

Das **erste Prinzip** ist für alle exergoökonomischen Anwendungen gültig, dagegen wird das **zweite Prinzip** nur bei Anwendungen, in denen neue Investitionen zu tätigen sind, eingesetzt.

# Thermodynamik und Wirtschaftlichkeit - 1

---

**“Exergy-Costing”** : Exergie ist die einzige sinnvolle Größe, auf die die Kosten in Energieumwandlungsanlagen bezogen werden können.

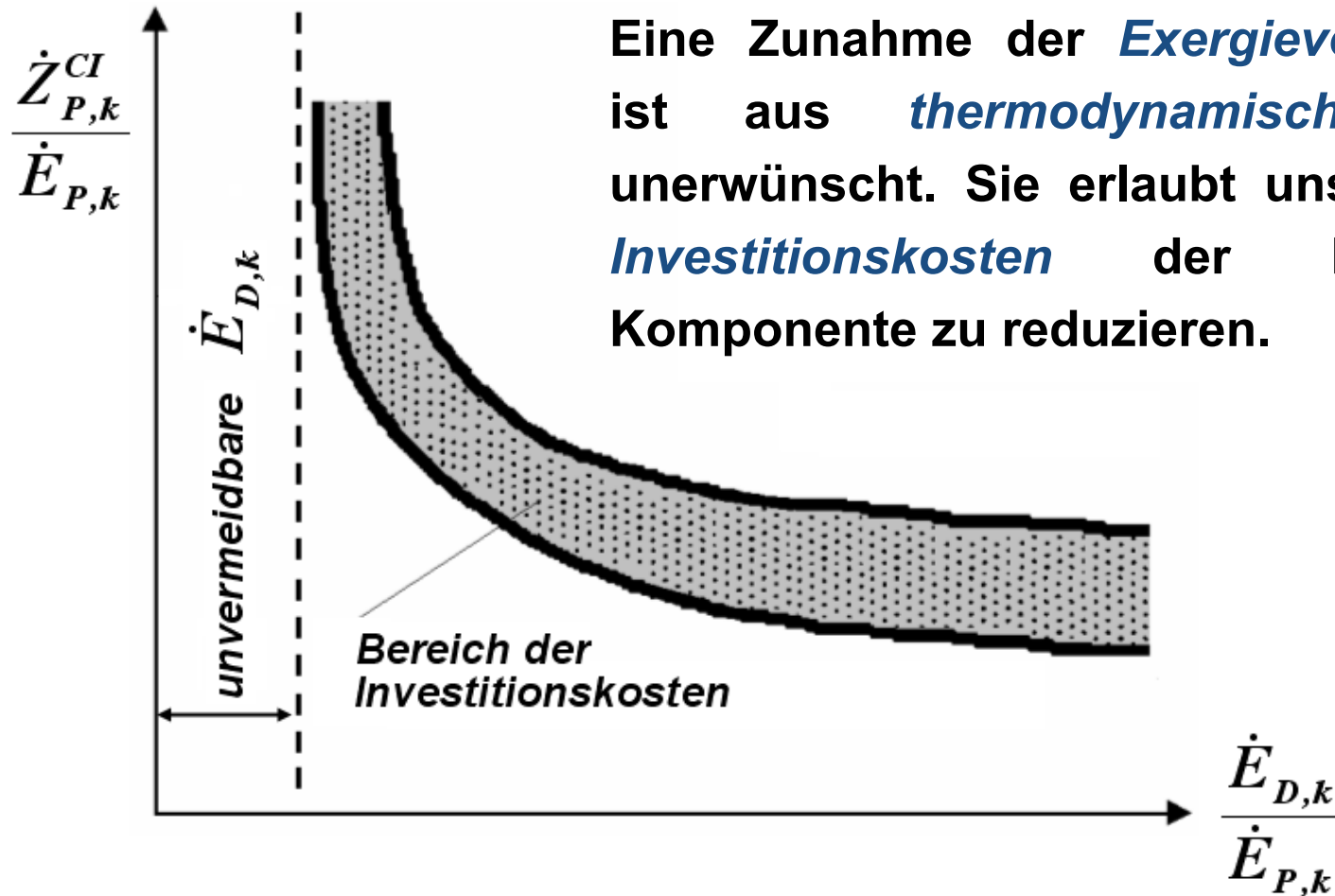
Die exergoökonomische Analyse basiert auf dem Prinzip des so genannten **“Exergy-Costing”** mit Hilfe dessen die exergiebezogenen Kostenströme für alle Stoff- und Energieströme in einer Anlage berechnet werden:

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}_j$$

$\dot{C}_j$  = Kostenstrom;     $\dot{E}_j$  = Exergiestrom;

$c_j$  = durchschnittliche Kosten pro Exergieeinheit

# Thermodynamik und Wirtschaftlichkeit - 2



Eine Zunahme der *Exergievernichtung* ist aus *thermodynamischer* Sicht unerwünscht. Sie erlaubt uns aber die *Investitionskosten* der betrachteten Komponente zu reduzieren.

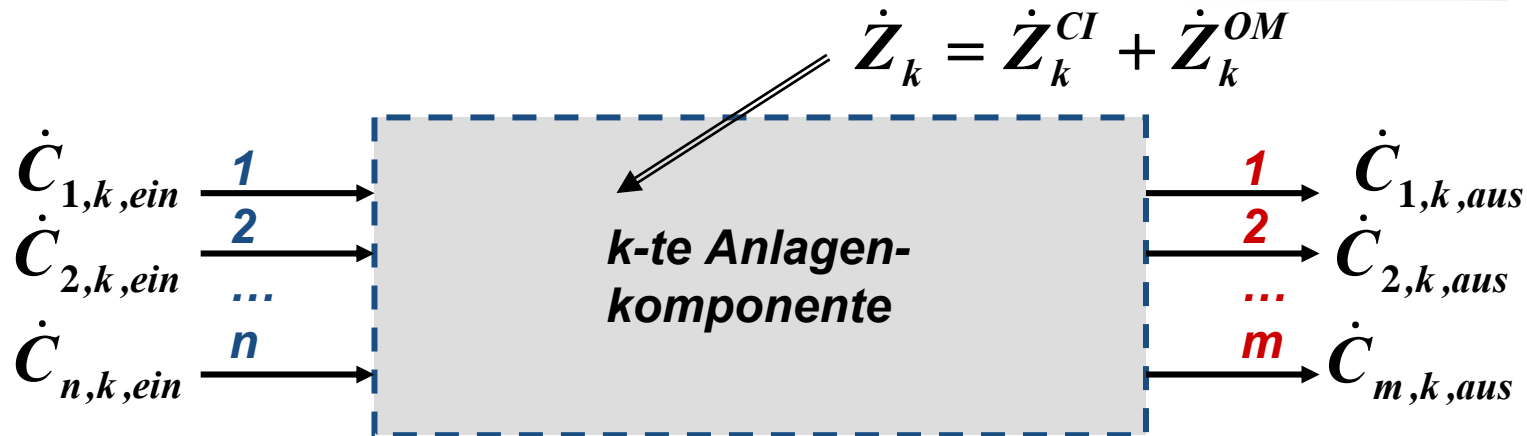
# Kostenströme, Aufwand und Nutzen

---

Die Kostenströme (  $\dot{C}_j$  ) oder die durchschnittlichen Kosten pro Exergieeinheit werden mit Hilfe von Kostenbilanzen (die für jede einzelne Anlagenkomponente erstellt werden) und Kosten-Hilfsbeziehungen berechnet.

Zusätzlich werden für jede Anlagenkomponente die Kostenströme, die mit dem exergetischen Aufwand, dem exergetischen Nutzen und der Exergievernichtung der Anlagenkomponente verbunden sind, berechnet.

# Kostenbilanz



## Kostenbilanz für die $k$ -te Anlagenkomponente

$$\dot{C}_{P,k} = \dot{C}_{F,k} + \dot{Z}_k$$

$$c_{P,k} \dot{E}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{F,k} + \dot{Z}_k$$

Kostenstrom, der mit der **Exergievernichtung** in der  $k$ -ten Anlagenkomponente verknüpft ist

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k}$$

# Reale Ursachen der auftretenden Kosten

---

***Die unterschiedlichen Ursachen der Kosten***, die in einer Energieumwandlungsanlage auftreten, sind:

- **Investitionskosten für jede Anlagenkomponente**
- **Betriebs- und Wartungskosten**
- **Kosten, die mit der Exergievernichtung in jeder einzelnen Anlagenkomponente verbunden sind**
- **Kosten, die mit dem Exergieverlust der Gesamtanlage verbunden sind**

# Iterative exergoökonomische Optimierung

---

Für jede der wichtigsten Anlagenkomponenten ist eine Entscheidung darüber zu treffen, ob

- (a) eine Verbesserung des Wirkungsgrades durch höhere Investitionsausgaben oder statt dessen
- (b) eine Reduzierung der Investitionskosten bei gleichzeitiger Verringerung des Wirkungsgrades die Kosteneffektivität der Gesamtanlage erhöhen kann.

Diese Entscheidung muss auf Grundlage aktueller Informationen über die *Investitionskosten* und *Kosten der Exergievernichtung* und/oder auf der Grundlage eines Vergleichs zwischen dem aktuellen und dem kostenoptimalen exergetischen Wirkungsgrad der betrachteten Anlagenkomponente getroffen werden.

# Exergoökonomische Variablen

---

Kostenstrom, der mit der *Exergievernichtung* in der  $k$ -ten Anlagenkomponente verbunden ist

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k}$$

Für die verschiedenen Anlagenkomponenten ergeben sich unterschiedliche durchschnittliche Kosten pro Exergieeinheit der Exergievernichtung.

Die Größe der Kosten pro Exergieeinheit der Exergievernichtung ist auch von der Position der betrachteten Anlagenkomponente innerhalb der gesamten Energieumwandlungsanlage abhängig.

**Gesamtanlage:** 
$$\dot{C}_{D,tot} = c_{F,tot} \dot{E}_{D,tot}$$

# Kosten der Exergievernichtung

---

Aus thermodynamischer Sicht ist jede Einheit der Exergievernichtung gleichbedeutend.

*Der exergoökonomische Ansatz* zeigt auf, dass die durchschnittlichen *Kosten* pro Einheit der Exergievernichtung für jede Anlagenkomponente unterschiedlich groß und von der Einordnung der Komponente in die Gesamtanlage abhängig sind: Anlagenkomponenten, die nahe der Exergiezufuhr zur Gesamtanlage angeordnet sind, weisen in der Regel geringere Kosten pro Einheit der Exergievernichtung auf im Vergleich zu Anlagenkomponenten, die nahe dem Bereich, in dem die Produktströme abgeführt werden, angeordnet sind.

## Exergoökonomische Variablen - 2

**Relative Kostendifferenz** zwischen den durchschnittlichen Kosten pro Exergieeinheit des exergetischen Nutzens und des exergetischen Aufwandes

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} = \frac{c_{F,k} \dot{E}_{D,k} + \dot{Z}_k}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{\dot{Z}_k}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}}$$

**Gesamtkostenstrom:**  $\dot{C}_{TOT,k} = \dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}$

**Exergoökonomischer Faktor:**

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k} \dot{E}_{D,k}}$$

# Iterative Exergoökonomische Optimierung

---

Bei der Anwendung der exergoökonomischen Methode ist zu beachten, dass die Werte *aller* exergoökonomischen Variablen vom Typ der Anlagenkomponente (z.B. Wärmeübertrager, Turbine, Verdichter oder chemischer Reaktor) abhängig sind.

Die Bewertung einer Variablen ( *hoch / niedrig* ) muss daher immer unter Berücksichtigung des Anlagenkomponententyps und vergleichend mit anderen Werten für genau diesen Typ von Anlagenkomponenten erfolgen.

Auf dieser Grundlage kann die Verwendung von wissensbasierten und „*Fuzzy*“ Systemen in Kombination mit einer exergoökonomischen Optimierung ein geeignetes Werkzeug für den Ingenieur darstellen.

# Erweiterte Analysen

---

Im Rahmen einer *konventionellen Exergieanalyse*, oder *konventionellen exergoökonomischen Analyse* können weder die gegenseitigen Abhängigkeiten der verschiedenen Anlagenkomponenten voneinander untersucht oder bewertet werden noch die vermeidbaren Verluste und Kosten identifiziert werden

Ermöglicht wird dies durch *erweiterte Analysen*, in denen die Exergievernichtung, die Investitionskosten oder die anlagenbezogenen Umweltbelastungen unterteilt werden in:

- einen *endogenen* und einen *exogenen* Anteil,
- einen *vermeidbaren* und einen *unvermeidbare* Anteil
- und die sich daraus ergebenden kombinierten Anteile.

## Definition: EN und EX Anteile

Die *endogene* Exergievernichtung (  $\dot{E}_{D,k}^{EN}$  ) einer Anlagenkomponente  $k$  beinhaltet den Anteil der Exergievernichtung, der sich ergibt, wenn alle Anlagenkomponenten „ideal“ (und somit ohne thermodynamische Verluste) und nur die Komponente  $k$  mit ihrem realen Wirkungsgrad  $\varepsilon_k$  betrieben werden. Dagegen umfasst die *exogene* Exergievernichtung (  $\dot{E}_{D,k}^{EX}$  ) den Anteil der Exergievernichtung in der  $k$ -ten Anlagenkomponente, der durch die Irreversibilitäten aller übrigen Komponenten verursacht wird.

Analog werden die *endogenen* (  $\dot{Z}_k^{EN}$  ) und *exogenen* (  $\dot{Z}_k^{EX}$  ) Investitionskosten definiert.

## Definition: UN und AV Anteile

---

Der **unvermeidbare** (  $\dot{E}_{D,k}^{UN}$  ) Anteil der Exergievernichtung in der  $k$ -ten Anlagenkomponente kann aufgrund von Beschränkungen der technischen und ökonomischen Möglichkeiten oder der verfügbaren Herstellungsverfahren nicht reduziert oder vermieden werden.

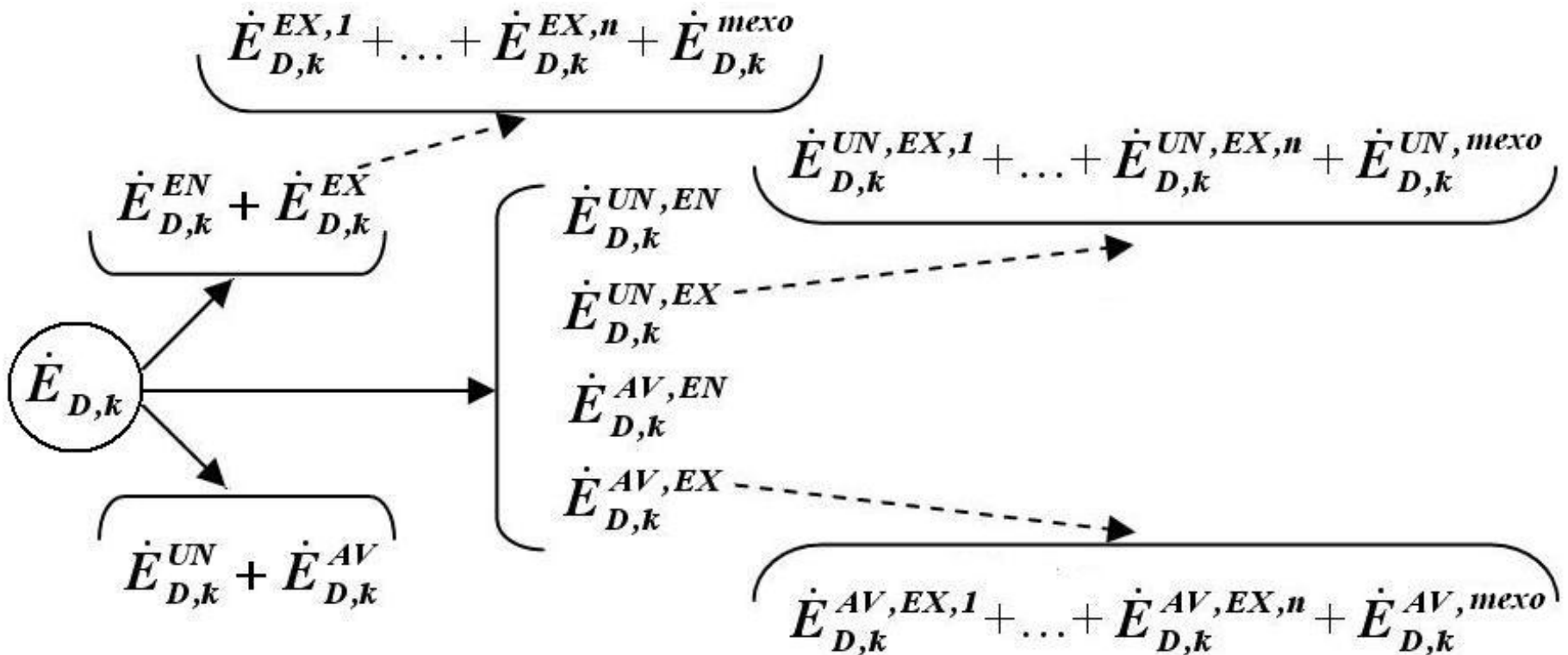
Die **vermeidbare** Exergievernichtung (  $\dot{E}_{D,k}^{AV}$  ) kann dagegen variiert werden und bietet somit im Rahmen einer Optimierung Potential, die Kosteneffektivität des Gesamtsystems zu erhöhen.

## Definition: UN und AV Anteile

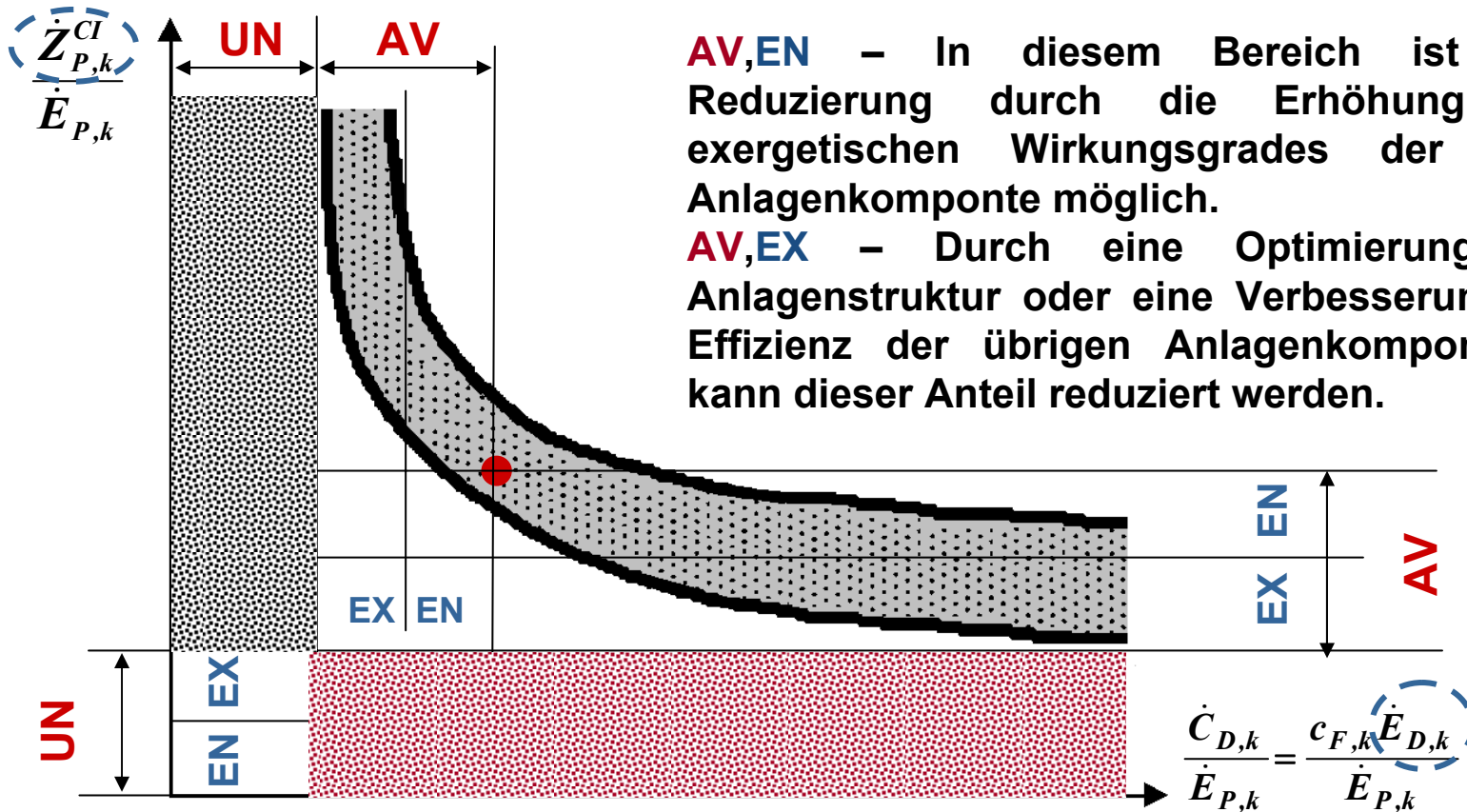
---

Die **unvermeidbaren** Investitionskosten (  $\dot{Z}_k^{UN}$  ) einer Anlagenkomponente können berechnet werden, indem eine **extrem ineffiziente** Komponente zugrunde gelegt wird. Um eine Anpassung an verschiedene Größen zu ermöglichen, werden für jede Anlagenkomponente unvermeidbare Investitionskosten pro Exergieeinheit des Nutzens  $\left( \dot{Z}_k / \dot{E}_P \right)_k^{UN}$  bestimmt.

# Unterteilung der Exergievernichtung

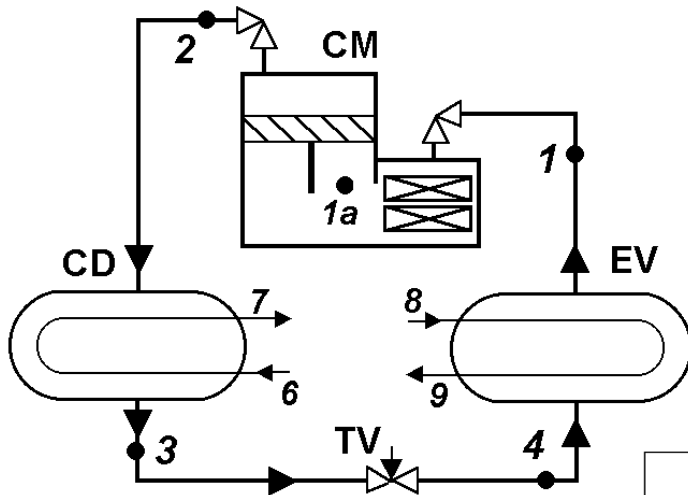


# Graphische Darstellung



Der unvermeidbare Anteil **UN** kann aufgrund von technischen oder wirtschaftlichen Beschränkungen in der Anlagenkomponente  $k$  oder in einer anderen Komponente für die gegebene Anlagenstruktur nicht reduziert werden.

# Fallstudie: Kältemaschine



$$Q_{cold} = 50 \text{ kW}$$

Arbeitsmedium: R134a

Wasser:  $T_8 = 5^\circ\text{C}$  und  $T_9 = 12^\circ\text{C}$

Wasser:  $T_6 = 20^\circ\text{C}$  und  $T_7 = 25^\circ\text{C}$

$$\dot{E}_{D,CM} = \dot{W}_{CM} - (\dot{E}_2 - \dot{E}_{1a})$$

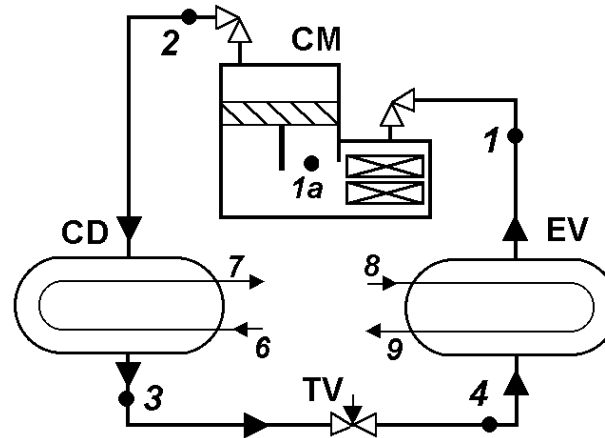
$$\dot{E}_{D,CD} = (\dot{E}_2 - \dot{E}_3) - (\dot{E}_7 - \dot{E}_6)$$

$$\dot{E}_{D,EV} = (\dot{E}_4 - \dot{E}_1) - (\dot{E}_9 - \dot{E}_8)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{D,TV} &= (\dot{E}_3^M - \dot{E}_4^M) - (\dot{E}_4^T - \dot{E}_3^T) \\ &= \dot{E}_3 - \dot{E}_4 \end{aligned}$$

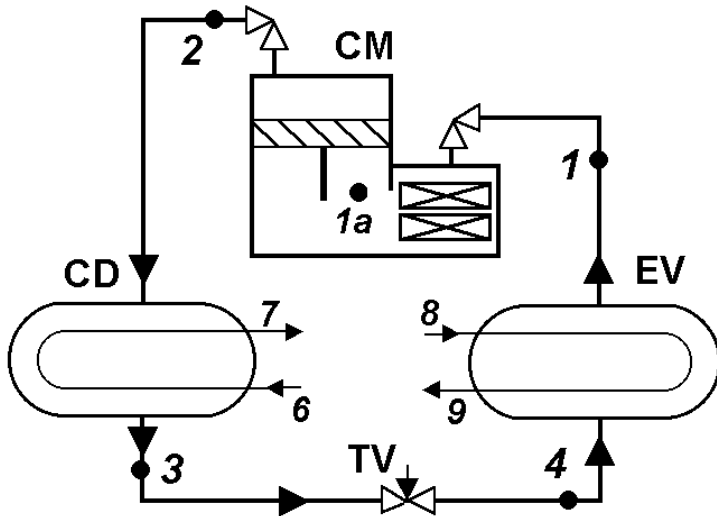
Stream	Working fluid	Thermodynamic analysis			
		$\dot{m}$ [kg/s]	$T$ [K]	$p$ [bar]	$e$ [kJ/kg]
1	R134a	0.3247	0	2.93	25.3
1a	R134a	0.3247	10	2.93	24.8
2	R134a	0.3247	49	8.16	47.5
3	R134a	0.3247	32	8.16	39.6
4	R134a	0.3247	0	2.93	36.6
6	Water	2.939	20	1.50	0.05
7	Water	2.939	25	1.42	0.22
8	Water	1.704	12	1.50	0.51
9	Water	1.704	5	1.42	1.71

# Fallstudie: Exergieanalyse



Component	$\dot{E}_{F,k}^{real}$ [kW]	$\dot{E}_{P,k}^{real}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{real}$ [kW]	$\varepsilon_k$ [%]	$y_k$ [%]
CM	8.554	7.381	1.173	86.3	13.7
CD	2.573	0.496	2.077	–	24.3
TV	4.858	3.864	0.994	79.5	11.6
EV	3.657	2.031	1.626	55.5	19.0

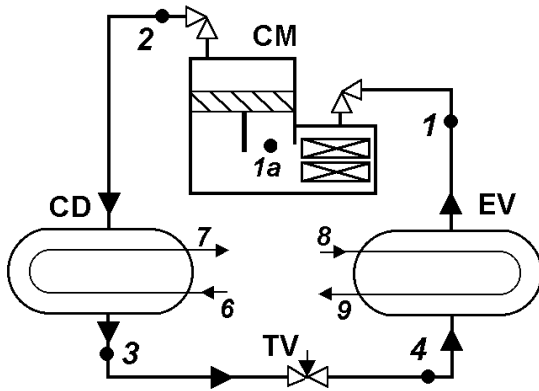
# Fallstudie: Exergoökonomische Analyse



Stream	Working fluid	Exergoeconomic analysis	
		$\dot{C}$ [€/h]	$c$ [€/GJ]
1	R134a	0.426	14.40
2	R134a	0.798	14.35
3	R134a	0.663	14.30
4	R134a	0.664	15.53
6	Water	0.004	6.72
7	Water	0.169	72.89
8	Water	0.002	0.65
9	Water	0.272	25.95

Component	$\dot{Z}_k$ [€/h]	$\dot{C}_{D,k}$ [€/h]	$\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}$ [€/h]	$c_{F,k}$ [€/GJ]	$c_{P,k}$ [€/GJ]	$r_k$ [-]	$f_k$ [%]
CM	0.165	0.028	0.193	6.72	14.3	1.13	85.32
CD	0.030	0.109	0.139	14.61	92.52	5.33	21.55
TV	0.001	0.051	0.052	14.30	18.06	0.26	1.92
EV	0.032	0.106	0.138	18.06	36.88	1.04	23.24

# Fallstudie: Erweiterte Analysen



Component	$\dot{E}_{D,k}^{real}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{EN}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{EX}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{UN}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ [kW]	Splitting $\dot{E}_{D,k}^{real}$ [kW]			
						$\dot{E}_{D,k}^{UN}$		$\dot{E}_{D,k}^{AV}$	
						$\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$	$\dot{E}_{D,k}^{UN,EX}$	$\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$	$\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$
CM	1.173	0.677	0.496	0.371	0.802	0.203	0.168	0.474	0.328
CD	2.077	1.799	0.278	0.640	1.437	0.588	0.052	1.211	0.226
TV	0.994	0.373	0.621	0.545	0.449	0.373	0.172	0	0.449
EV	1.626	1.626	0	0.756	0.870	0.756	0	0.870	0

Component	$\dot{Z}_k$ [€/h]	$\dot{Z}_k^{EN}$ [€/h]	$\dot{Z}_k^{EX}$ [€/h]	$\dot{Z}_k^{UN}$ [€/h]	$\dot{Z}_k^{AV}$ [€/h]	Splitting $\dot{Z}_k^{real}$ [€/h]			
						$\dot{Z}_k^{UN}$		$\dot{Z}_k^{AV}$	
						$\dot{Z}_k^{UN,EN}$	$\dot{Z}_k^{UN,EX}$	$\dot{Z}_k^{AV,EN}$	$\dot{Z}_k^{AV,EX}$
CM	0.165	0.093	0.071	0.114	0.051	0.065	0.049	0.029	0.022
CD	0.030	0.028	0.002	0.020	0.010	0.019	0.001	0.009	0.001
TV	0.001	0.001	0	0.001	0	0.001	0	0	0
EV	0.032	0.032	0	0.007	0.025	0.007	0	0.025	0

# Schlussfolgerungen - 1

---

Das *Exergiekonzept* vervollständigt und erweitert eine Energieanalyse durch die Berechnung

- (a) des realen thermodynamischen Wertes eines Energieträgers,
- (b) der realen thermodynamischen Verluste in einer Energieumwandlungsanlage und
- (c) von Variablen, mit deren Hilfe die thermodynamische Ausführung einer Anlage (oder einer Anlagenkomponente) eindeutig und präzise charakterisiert werden kann. Somit liefert das Exergiekonzept die Basis für die eindeutige Zuordnung von Kosten (und Umweltbelastungen) zu Energieträgern und zu thermodynamischen Verlusten.

Die vorgestellte Methode bietet die Möglichkeit einer einheitlichen *Bewertung eines energietechnischen Systems* unter *thermodynamischen, ökonomischen* und *ökologischen* Gesichtspunkten.

## Schlussfolgerungen - 2

---

Der ***exergoökonomische Ansatz*** ermöglicht die objektive Zuordnung von Kosten zu Energieträgern und bietet wertvolle Informationen für Entscheidungsprozesse im Rahmen des Entwurfes und der Optimierung von Energieumwandlungsanlagen.

Darüber hinaus zeigt die ***exergoökonomische Methode*** auf, dass die Exergievernichtung einer Anlagenkomponente auch einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Energieumwandlungsanlagen hat. Die Inkaufnahme einer höheren Exergievernichtung bietet die Möglichkeit, die Investitionskosten einer Anlagenkomponente zu reduzieren.

## Schlussfolgerungen - 3

---

Die **exergoökonomische** und **exergoökologische Ansätze** ermöglichen eine gute Abstimmung zwischen den Kosten (bzw. Umweltbelastungen), die mit den thermodynamischen Verluste verbunden sind und den Komponentenbezogenen Investitionsausgaben (bzw. Umweltbelastungen).

Mit Hilfe dieser Methoden können die Kosten der realen thermodynamischen Verluste für jede einzelne Anlagenkomponente berechnet werden. Damit können die wahren Ursachen für die Zunahme der Kosten in einer Anlage aufgedeckt und bewertet werden.

## Schlussfolgerungen - 4

---

Eine **erweiterte exergoökonomische** und **exergo-ökologische Bewertung** konzentriert sich nur auf die **vermeidbaren** thermodynamischen Verluste, Investitionskosten und anlagenbezogenen Umweltbelastungen.

Die **erweiterte Bewertung** ermöglicht es,

- eine einzelne Anlagenkomponente und gleichzeitig auch ihre Wechselwirkungen mit allen übrigen Anlagenkomponenten sowie
- das Verbesserungspotential für Komponenten und Anlagen zu untersuchen.

## Schlussfolgerungen - 5

---

Durch das Aufzeigen der Verknüpfung von *Thermodynamik* und *Wirtschaftlichkeit* beim Entwurf von Energieumwandlungsanlagen erhöht und unterstützt der *exergoökonomische Ansatz* das Wissen, die Erfahrung und die Kreativität eines Ingenieurs. Für die Analyse und Optimierung von Energieumwandlungsanlagen werden wertvolle Werkzeuge bereitgestellt, um die Kostenströme und deren Abhängigkeiten in einer Anlage zu veranschaulichen und zu verstehen.

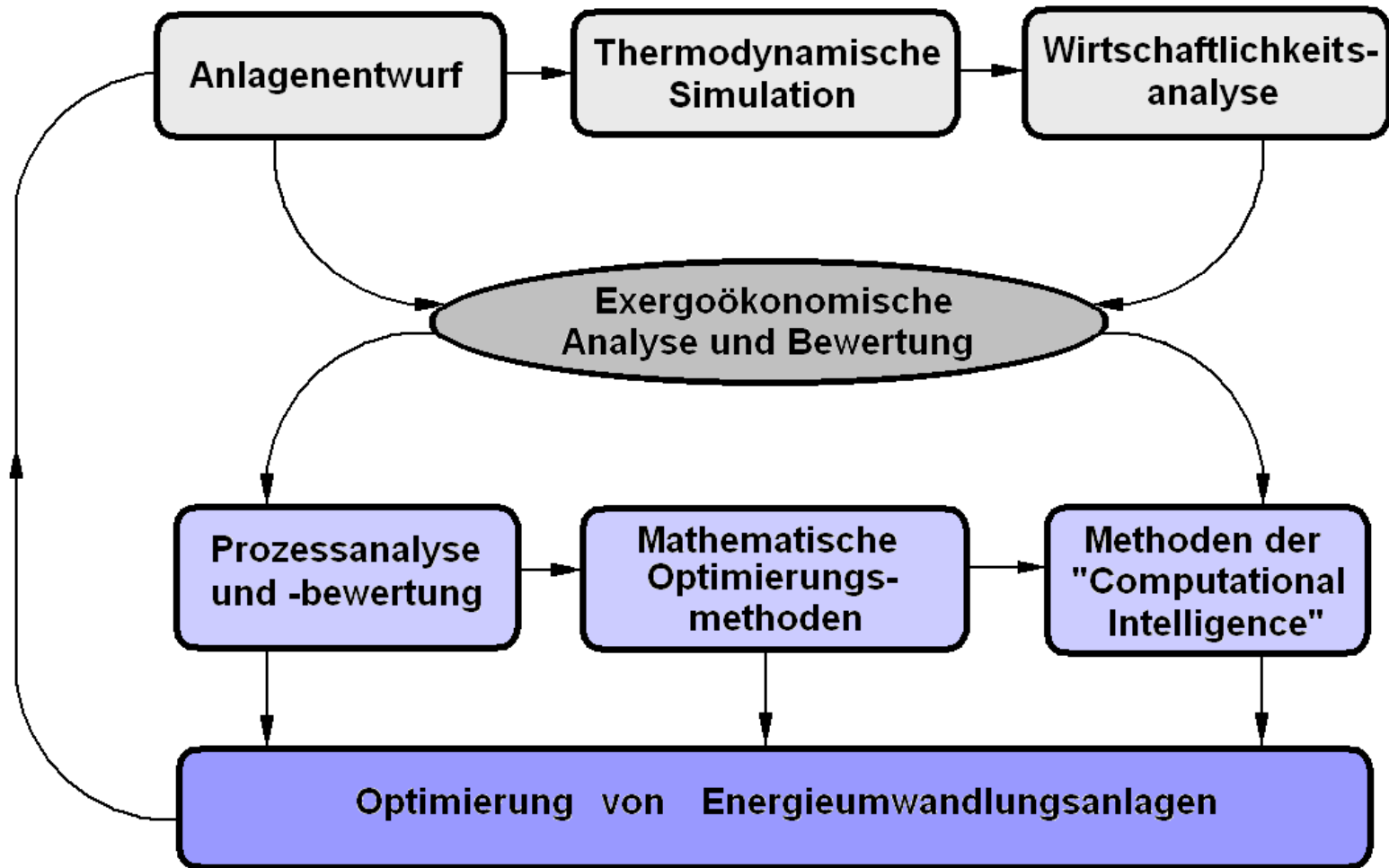
---

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit

---

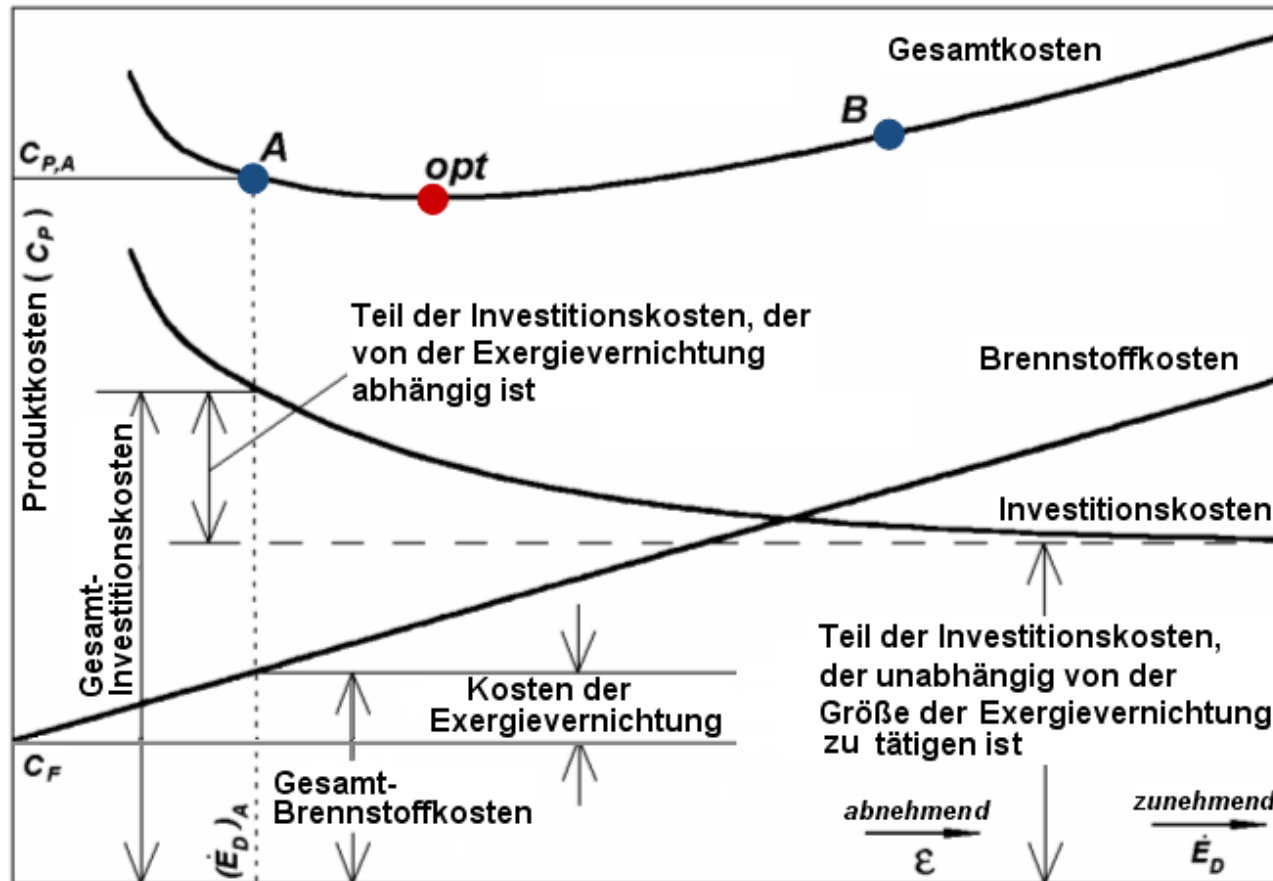
# Anhang A

# Einsatz der exergoökonomischen Methode im Optimierungsprozess

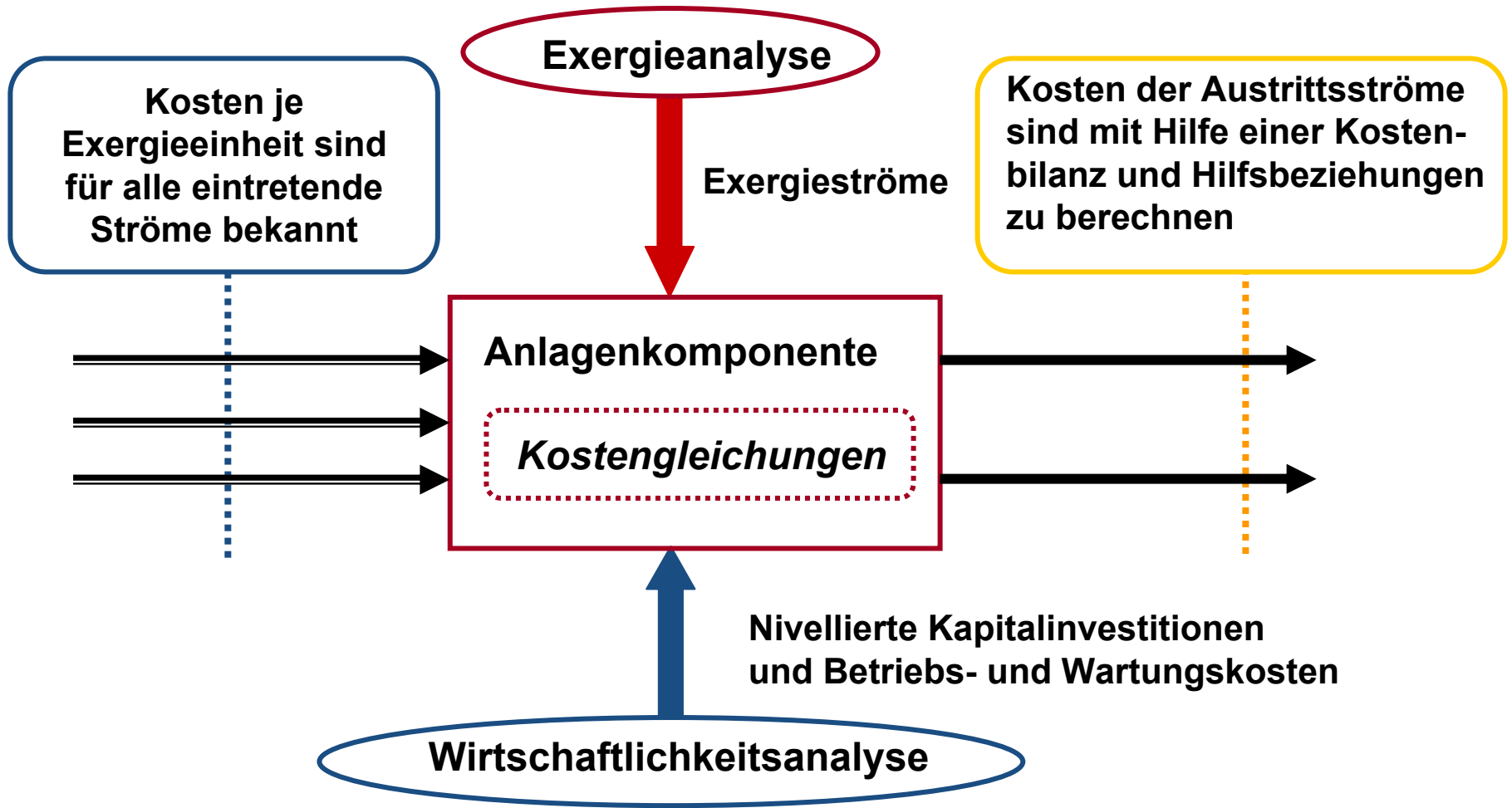


# Exergoökonomisches Prinzip

Schematische Darstellung zur Entwicklung der Beiträge von Brennstoff- und Investitionskosten zu den Gesamt-Produktkosten einer Anlage in Abhängigkeit vom exergetischen Wirkungsgrad (oder der Exergievernichtung)



# “Exergy-Costing” und Kostenbilanz



# Kosten-Hilfsbeziehungen

---

## *F* - Gleichungen

Gesamtkosten, die mit der Abgabe von Exergie aus einem Exergiestrom innerhalb einer Anlagenkomponente verbunden sind

=

Kosten, zu denen diese Exergie dem Strom in einer vorgelagerten Anlagenkomponente zugeführt wurde

Die Exergiedifferenz in dem betrachteten Strom, die zwischen Ein- und Austritt der Anlagenkomponente auftritt, wird bei der Definition des *exergetischen Aufwandes (fuel)* für diese Anlagenkomponente verwendet.

## ***P* - Gleichungen**

Jede Einheit Exergie wird jedem Exergiestrom, der bei der Definition des *exergetischen Nutzens* (*product*) verwendet wird, zu den gleichen durchschnittlichen Produktkosten  $c_{P,k}$  zugeführt.

Diese Kosten werden mit Hilfe der *F* – Gleichungen aus der Kostenbilanz berechnet.

# Iterative exergoökonomische Optimierung

---

Die ***iterative exergoökonomische Optimierung*** einer komplexen Energieumwandlungsanlage verwendet die in der Praxis übliche Vorgehensweise.

Für die Berechnung eines exakten mathematischen Optimums müsste ein vollständiges thermodynamisches und ökonomisches Modell der gesamten Anlage zugrunde gelegt werden. In einem solchen Modell können wichtige Randbedingungen wie z.B. Teillastverhalten, Sicherheitsaspekte, Wartungsaufwand oder Verfügbarkeit zur Zeit noch nicht zufrieden stellend berücksichtigt werden.

Mit Hilfe der ***iterativen Optimierung*** kann eine sehr gute, nahezu „optimale“ Lösung gefunden werden.

# Exergoökonomische Bewertung - 1

---

Folgende Regeln werden bei der exergoökonomischen Bewertung verwendet, um im Rahmen einer iterativen Optimierung die Produktkosten der Gesamtanlage zu reduzieren:

- Ordnen der Anlagenkomponenten nach der Größe der Summe der Kostenströme ( $C_{D,k} + Z_k$ ), die die Relevanz der Komponenten kennzeichnet; je größer die Summe ist, umso detaillierter ist die zugehörige Anlagenkomponente zu betrachten,
- der exergoökonomische Faktor  $f_k$  zeigt die Hauptursache für die Kostenzunahme auf (Investitionskosten oder Kosten, die mit der Exergievernichtung verbunden sind)

# Exergoökonomische Bewertung - 2

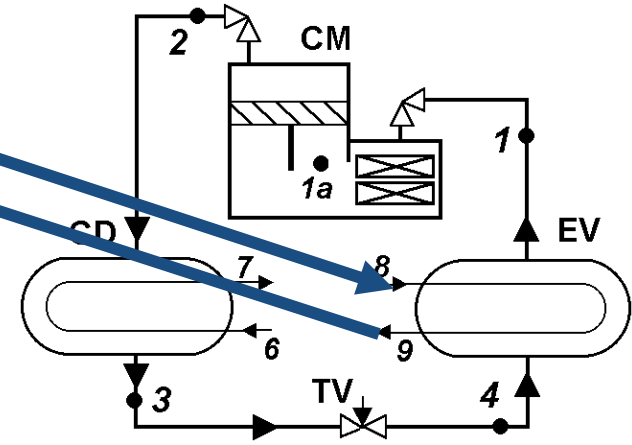
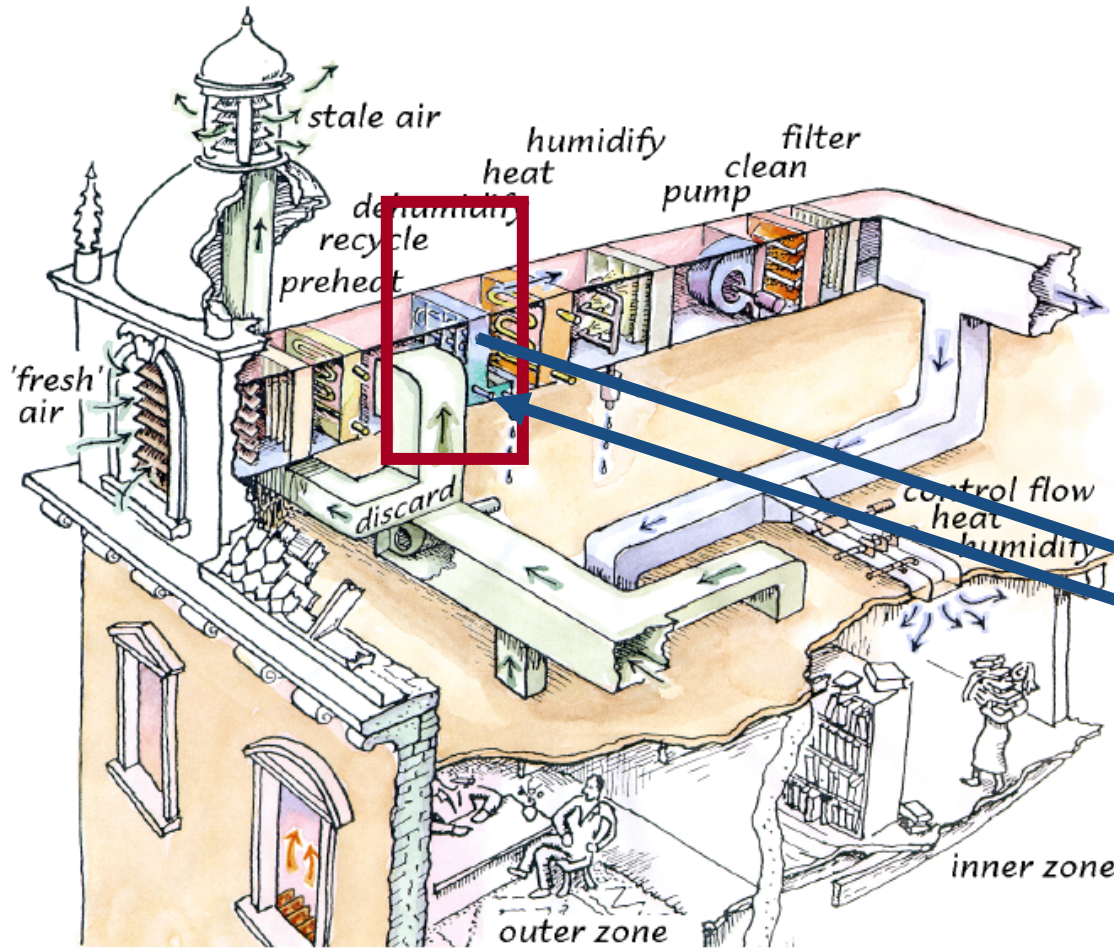
---

- für einen hohen Wert  $f_k$  , sollte untersucht werden, ob eine Reduzierung der Investitionskosten für die  $k$ -te Anlagenkomponente (verbunden mit einer Verringerung des exergetischen Wirkungsgrades  $\varepsilon_k$  ) die Kosteneffektivität der Gesamtanlage verbessern kann;
- für einen niedrigen Wert  $f_k$  , sollte der exergetische Wirkungsgrad der Anlagenkomponente  $\varepsilon_k$  durch den Einsatz höherer Investitionskosten verbessert werden.

---

# Anhang B

# Fallstudie: Kältemaschine für eine Klimasystem



# Methodology for Splitting

---

*The methodology for splitting* the exergy destruction and the investment cost into endogenous/exogenous and avoidable/unavoidable parts and their combinations *is based* in this example *on thermodynamic cycles (processes)*.

The following thermodynamic cycles are needed:

The *real cycle (process)*

The *theoretical cycle (process)* that corresponds to the given real cycle

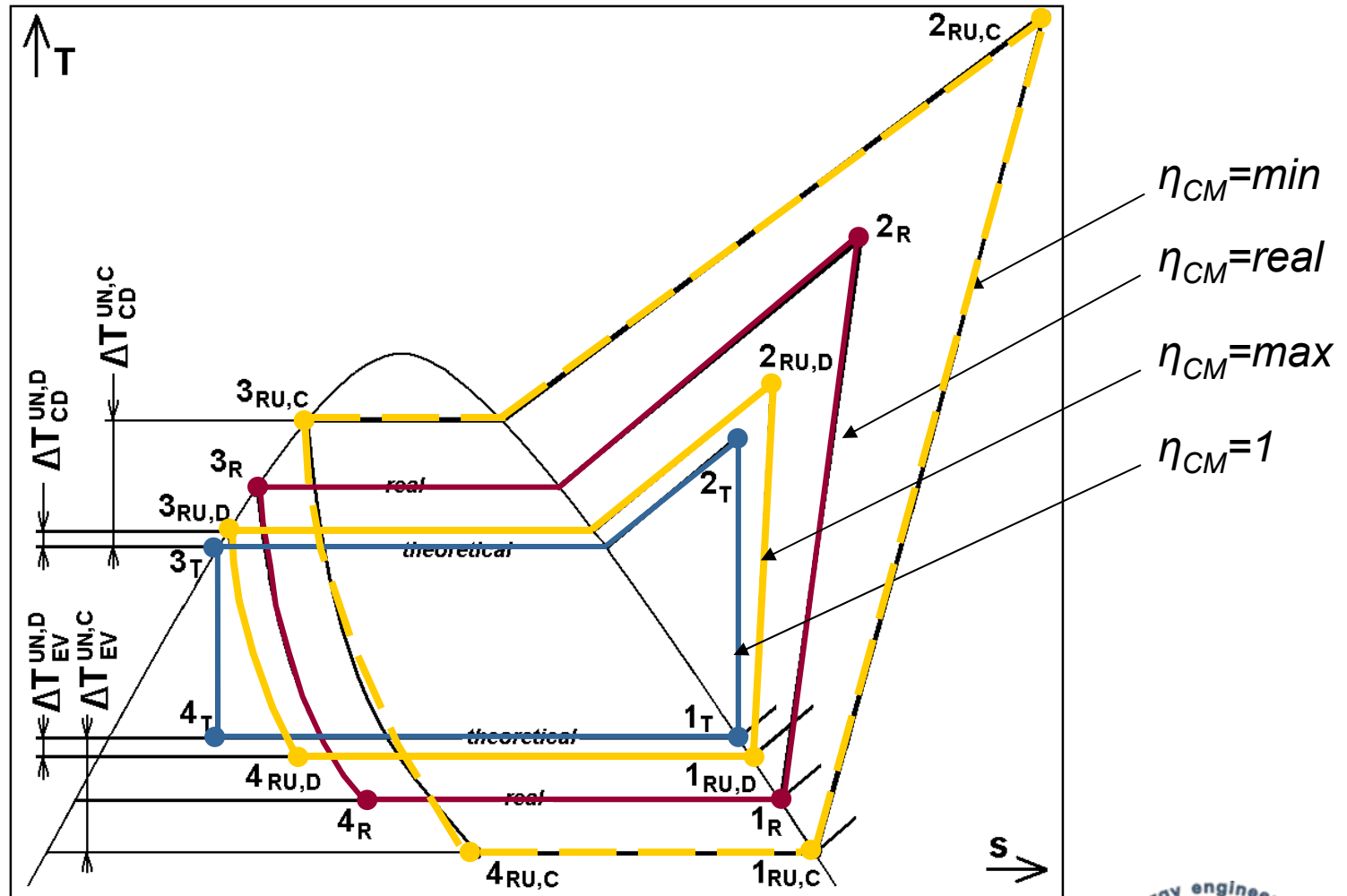
The *cycle (process) with unavoidable exergy destruction*

The *cycle (process) with unavoidable investment cost*

The *hybrid cycles (processes)*.

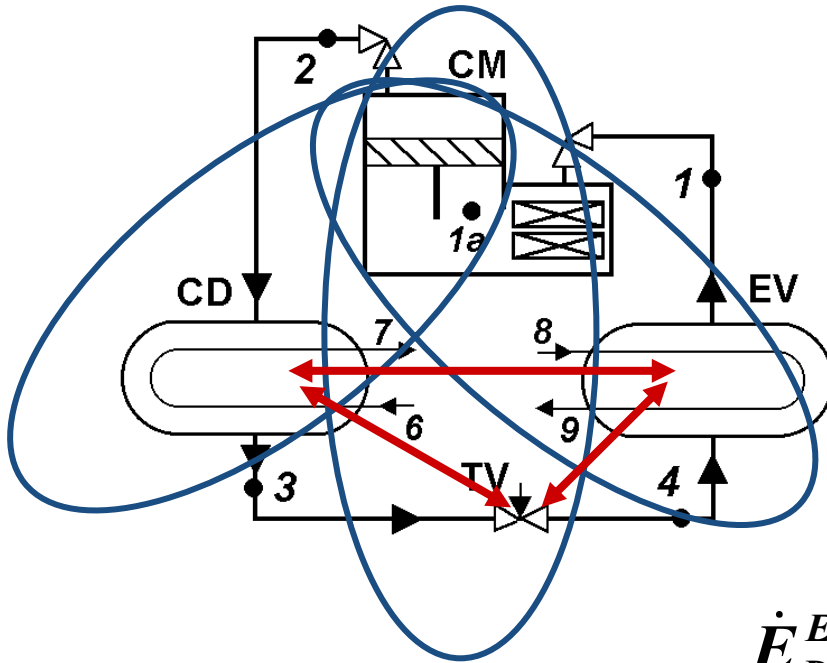
The *hybrid cycle* contains only one process which is conducted with the same efficiency as in the *real cycle* while all other processes correspond to the theoretical cycle.

# Refrigeration machine. Methodology: UN Exergy Destruction and Cost - 1





# Beispiel: Refrigeration machine



$$\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{D,k}$$

$$\dot{E}_{D,k}^{EN} + \dot{E}_{D,k}^{EX}$$

$$\dot{E}_{D,k}^{EX,(n-1)}$$

$$\dot{E}_{D,k}^{EX,(n)}$$

$$\dot{E}_{D,k}^{EX,(n+1)}$$

$$\dot{E}_{D,k}^{EX} > \dot{E}_{D,k}^{EX,(n-1)} + \dot{E}_{D,k}^{EX,(n)} + \dot{E}_{D,k}^{EX,(n+1)}$$

$$\dot{E}_{D,k}^{EX} = \dot{E}_{D,k}^{EX,(n-1)} + \dot{E}_{D,k}^{EX,(n)} + \dot{E}_{D,k}^{EX,(n+1)} + \dot{E}_{D,k}^{MX}$$

**Mexogene Exergievernichtung**