

## MODUL 1.4

$$E = mc^2$$

# Grundlagen zum Thema Energie und die theoretischen Konzepte von EINSTEIN

# Inhalt

- 1. Allgemeines**
- 2. Einsteins theoretische Konzepte**
  - ✓ **Energieflüsse**
  - ✓ **Temperaturniveau**
  - ✓ **Prozessmodelle**
  - ✓ **Lastprofile**



# Energieverbrauch

Der Energieverbrauch kann ausgedrückt werden als:

- 1) **Endenergie** = Energiegehalt der verschiedenen Energieträger, die an ein Unternehmen geliefert werden.
  - EINSTEIN Definition: der Energiegehalt von Brennstoffen wird als  $H_i$  (unterer Heizwert) angegeben
- 2) **Primärenergie** = Gesamtenergie, die für die Erzeugung der erforderlichen Energiemenge notwendig ist
  - Unter Berücksichtigung aller Verluste in den verschiedenen Verfahrensabschnitten der Brennstoffherzeugung.

# Arten der Energienutzung

## 1) Thermische Zwecke:

- ✓ Wärme- und Kältezufuhr für Prozesse
- ✓ Raumwärme und –kühlung von Gebäuden (Produktionshallen, Büros...)
- ✓ Warmwasser im Sanitärbereich

## 2) Nicht thermische Zwecke:

- ✓ Elektrischer (und anderer) Energieverbrauch für Beleuchtung, Maschinen und andere Elektrogeräte
  - außer Klimaanlage, Kühl- und Heizgeräte

### Nicht in EINSTEIN berücksichtigte Verwendungszwecke:

- ✓ Nicht energetische Nutzung von Brennstoffen
- ✓ Energieverbrauch für den Transport
- ✓ in den Rohstoffen enthaltene Energie (die aber nicht im Prozess genutzt wird)

# Arten der Energienutzung

Anteil des Energiebedarfs für thermische Zwecke am gesamten Endenergiebedarf:

Thermische Energie in der Industrie: 28 %

Raumheizung und –kühlung in Gebäuden : 27 %

Energieverbrauch für thermische Zwecke in der europäischen Industrie:

- ✓ fast 70 % des Gesamtverbrauchs an Endenergie
- ✓ mehr als 50 % des Gesamtverbrauchs an Primärenergie

# Erneuerbare Energie

---

Erneuerbare Energiequellen für Wärme- und Kälteversorgung :

- ✓ Solarthermie (inkl. solarthermische KWK)
- ✓ Biomasse und Biogas
- ✓ Geothermie, ...

# Auswirkungen auf die Umwelt

**Hauptindikatoren** für eine Analyse der  
Umweltauswirkungen bei EINSTEIN:

✓ **Primärenergieverbrauch**

(= Hauptindikator)

✓ **CO<sub>2</sub>-Ausstoß**

✓ Anfallen von **hochradioaktivem (HR) Atommüll**  
(aufgrund des Stromverbrauchs)

✓ **Wasser**verbrauch

# Bedarfs- und verbrauchsorientierte Versorgungsstrategien

Um Energie zu sparen

- ✓ muss zuerst nach Möglichkeiten, den **Energiebedarf** zu **reduzieren** gesucht werden.
- ✓ Erst danach soll der **verbleibende Wärme- und Kältebedarf** mit einem energie- und umwelttechnisch optimierten Wärme und Kälteversorgungssystem gedeckt werden.

## BEISPIEL

- ✓ Prozess: Erhitzen von Wasser auf 90 °C
- ✓ Alternative Reinigungsprozesse:
  - Reinigung bei niedrigerer Temperatur mit Reinigungsmitteln oder Druck
  - Reinigungsbedarf vermeiden, in dem ein Prozess, der Staub verursacht in einen abgeschlossenen Raum verlegt wird
  - usw.



# Energieflüsse

## Definitionen 1

### ✓ **Endenergieverbrauch (FEC)**

Energie, die in Form von Brennstoffen, Strom oder Fernwärme, -kälte an ein Unternehmen geliefert wird (als  $H_i$ )

### ✓ **Endenergieverbrauch für thermische Zwecke (FET)**

Endenergie, die für thermische Zwecke (Heizen oder Kühlen) genutzt wird, inkl. Strom für Klimaanlage und elektrisches Heizen/Kühlen.

### ✓ **Endenergieverbrauch für andere (nicht thermische) Zwecke (FEO)**

Endenergie, die für nicht thermische Zwecke genutzt wird

$$E_{FEC} = E_{FET} + E_{FEO}$$

# Energieflüsse

## Definitionen 2

### ✓ **Endenergieverbrauch (FEC, FET)**

$$E_{FEC} = E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{fuels}} E_{FEC, fuel(i)} + E_{FEC, heat}$$

$$E_{FEC} = E_{FET} + E_{FEO}$$

$$E_{FET} = \sum_{j=1}^{N_{eq}} E_{FET, j}$$

#### Legende:

$i = 1, \dots, N_{fuels}$

$N_{fuel}$  = Anz. der Brennstoffe in einem Betrieb

$j = 1, \dots, N_{eq}$

$N_{eq}$  = Anz. der therm. Geräteeinheiten

# Energieflüsse

## Definitionen 3

### ✓ *Endenergieverbrauch (FEC, FET)*

**KWK Energieverbrauch =**  
Brennstoffverbrauch - selbsterzeugter Strom

$$E_{FET, j} = E_{FET, fuel(j)} - E_{FET, elgen, j}$$

# Energieflüsse

## Definitionen 4

- ✓ **Primärenergieverbrauch (PEC)**
- ✓ **Primärenergieverbrauch für therm. Zwecke (PET)**
- ✓ **Primärenergieverbrauch f. nicht therm. Zwecke (PEO)**



werden aus **FEC, FET, FEO** mithilfe verschiedener Umwandlungsfaktoren errechnet

$$E_{PEC} = f_{PE,el} E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{fuels}} f_{PE,i} E_{FEC,fuel(i)} + f_{PE,heat} E_{FEC,heat}$$

### Legende:

$i = 1, \dots, N_{fuels}$

$N_{fuel}$  = Anz. der Brennstoffe in einem Betrieb

$f_{PE,el}$  = Primärenergie-Umwandlungsfaktor f. Strom

$f_{PE,i}$  = Primärenergie-Umwandlungsfaktor f. Brennstoffe

# Energieflüsse

## Definitionen 5

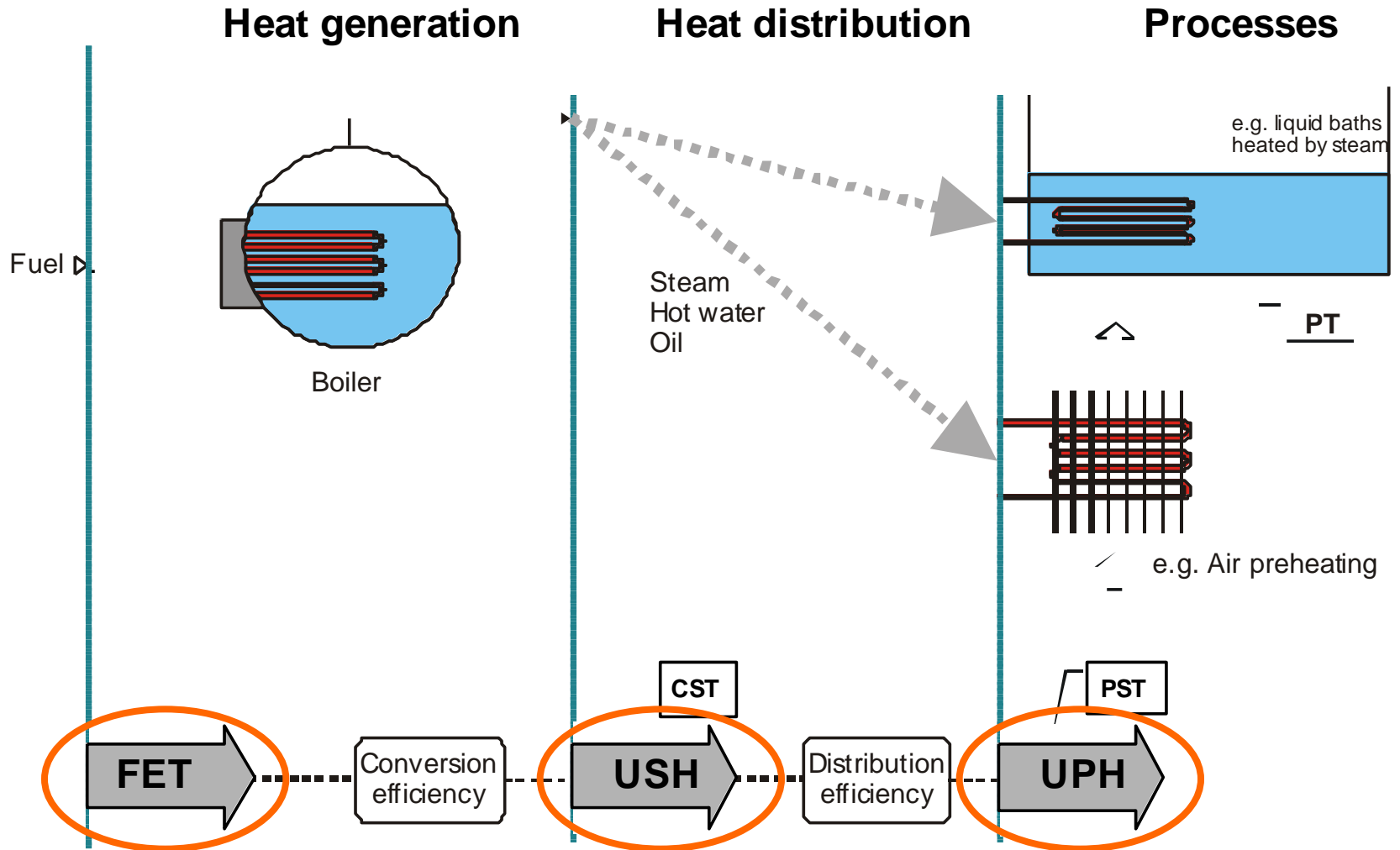
- ✓ **Nutzwärme, -kälte (USH/ USC – useful supply heat/cooling;)**

die im Wärme (Kälte-)versorgungssystem (Kessel, Brenner, Kälteanlage) erzeugte Wärme (Kälte), die den verschiedenen wärme- (kälte-)verbrauchenden Prozessen in Form von Dampf, heißer Luft, heißem Wasser und Kaltwasser usw. zugeführt wird.

- ✓ **Prozesswärme, -kälte (UPH/UPC – useful process heat/cooling)**

die einem Prozess zugeführte Wärme (Kälte) (beim Eingang in den Prozesswärmetauscher gemessen)

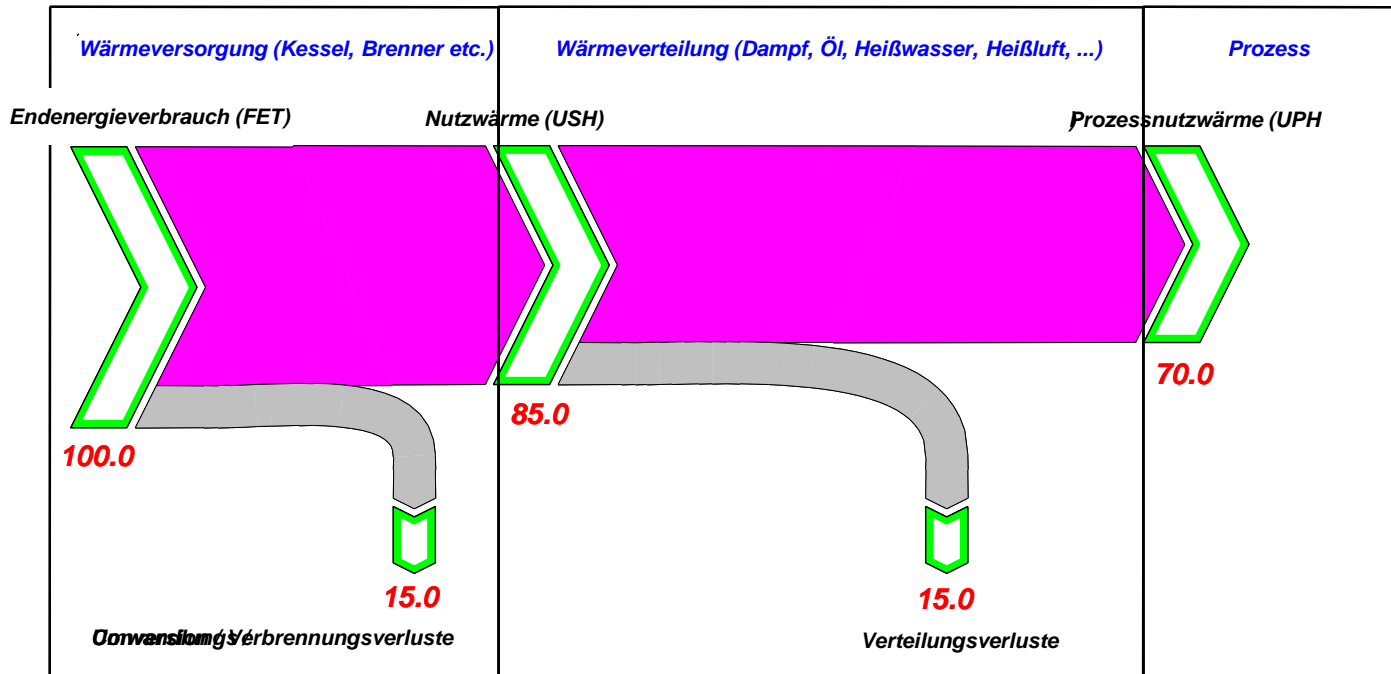
# Energieflüsse



# Energieflüsse

## Definitionen 6

- ✓  $USH_j / FET_j$  = Umwandlungseffizienz des Systems „j“
- ✓  $UPH_m / USH_m$  = Verteilungseffizienz der Leitung „m“



### ✓ **Verfügbare Abwärme/Kälte ( $Q_{WH}/Q_{WC}$ )**

Energiefluss, der nicht das Hauptprodukt eines Systems ist:

- Im Abgas eines Kessels enthaltene Wärme
- Kondensat aus einer Dampfleitung
- Im Abwasser eines Waschvorgangs enthaltene Wärme
- Kalte Abluft einer Kühlkammer

**Beispiel für Prozessabwärme:**

$$Q_{QWH, Proc} = q_{m,o} (h_{po} - h_{min}) t_{op}$$

$$Q_{QWH, Proc} = m c_p (T_p - T_{min}) N_s$$

**Legende:**

**$qm$**  = Massenfluss

**$m$**  = Masse im Behälter

**$N_s$**  = Anzahl der  
Inbetriebnahmen

**$T_{OpProc}$**  = Prozessdauer



# Energieflüsse

## Definitionen 8

### ✓ **Rückgewonnene** **(QH<sub>X</sub>/QC<sub>X</sub>)**

### **Abwärme/Kälte**

Energiefluss-Zufuhr in ein System aus einer Wärmerückgewinnung:

- Vorwärmen von Verbrennungsluft und/oder Kessel-Speisewasser
- Vorwärmen von Wasser beim Zulauf eines Waschvorgangs
- Vorwärmen des Rücklaufs in einem Warmwasserverteilerkreis

### ✓ **Direkter Austausch zwischen Wärme und Kältebedarf (QD<sub>H</sub>/QD<sub>C</sub>) möglich**

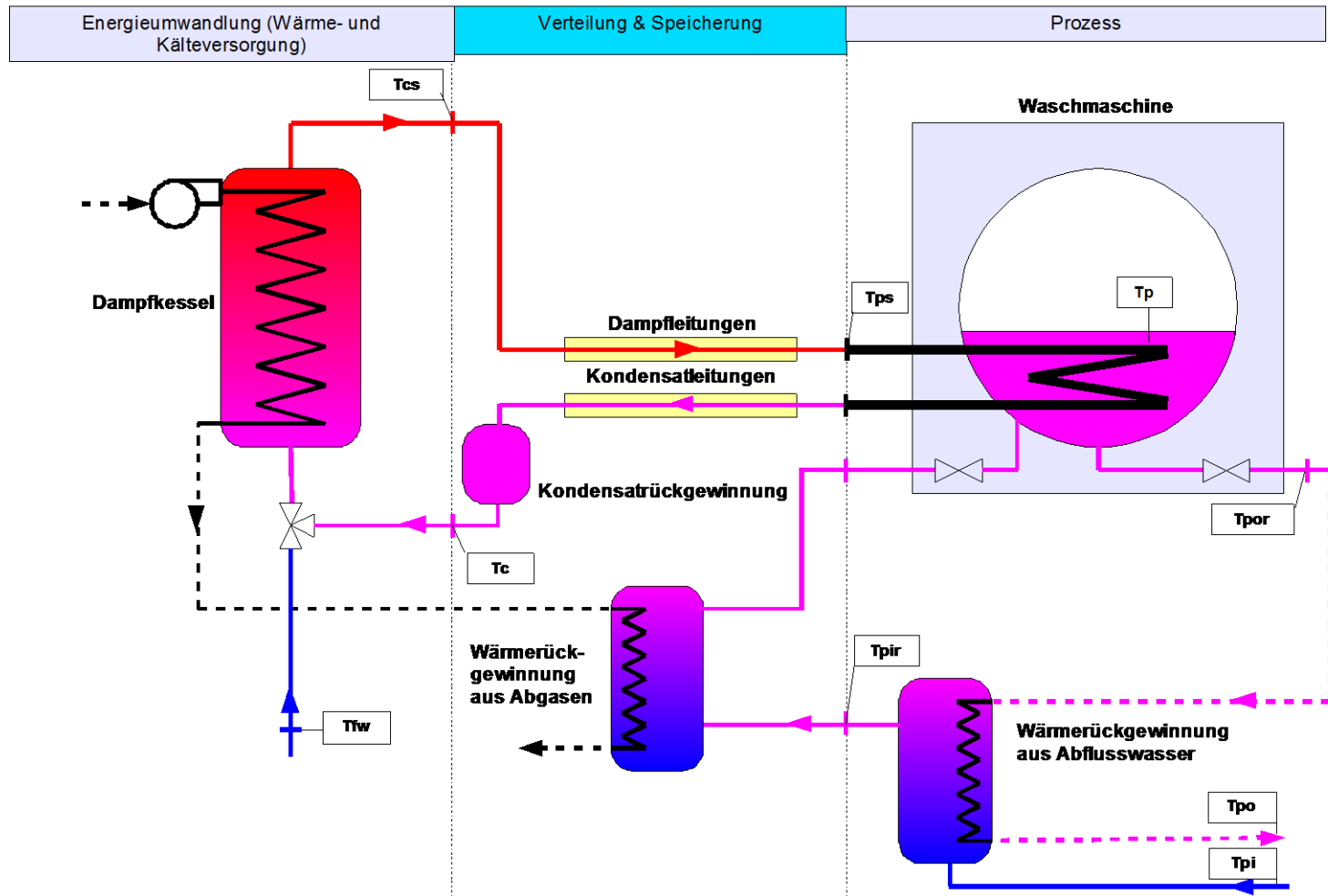
- Kühlbedarf bei hohen Temperaturen als Quelle für Wärmerückgewinnung
- Wärmebedarf bei niedrigen Temperaturen als Quelle für Kälterückgewinnung
- => **Doppelte Einsparung von externer Wärme- und Kältezufuhr**

$$\sum_{h=1}^{N_{HX}} Q_{hx,h} \leq \sum_{source} Q_{QWH,source} + \sum Q_{D,cooling}$$

**Legende:**

$N_{HX}$  = Anz. Der Wärmetauscher

# Energieflüsse



**Bsp eines industriellen Waschvorgangs im EINSTEIN-Schema mit versch. Wärmerückgewinnungsarten:**

# Energieflüsse

## Definitionen 9

### ✓ **Nutzwärme (USH)**

$$\dot{Q}_{USH, j} = \dot{Q}_{USH, Eq, j} + \dot{Q}_{QHx, j}$$

$\dot{Q}_{USH, Eq, j}$  = die im Gerät „j“ erzeugte Wärme

$\dot{Q}_{QHx, j}$  = die rückgewonnene Abwärme, die im Gerät „j“ genutzt wird

**Legende:**

$j = 1, \dots, N_{eq}$

$N_{eq}$  = Anz. Der therm. Geräteeinheiten

# Energieflüsse

## Definitionen 10

### ✓ Nutzwärme (**USH**) nach Leitungen

$$\dot{Q}_{USH, pipe, m} = \dot{Q}_{USH, m} + \dot{Q}_{QHx, m}$$

Für offene Wirkungskreise:

$$\dot{Q}_{USH, pipe, m} = q_{m, o} h_o - q_{m, ret} h_{ret} - q_{m, i} h_i$$

$\dot{Q}_{USH, pipe, m}$  = Wärme, die in die einzelnen Verteilleitungen einströmt

**Legende:**

$m = 1, \dots, N_{pipe}$

$N_{pipe}$  = Anz. der Verteilleitungen

$q_m$  = Massenfluss

$o$  (Ausgang),  $ret$  (Rücklauf),  $i$  (Eingang)

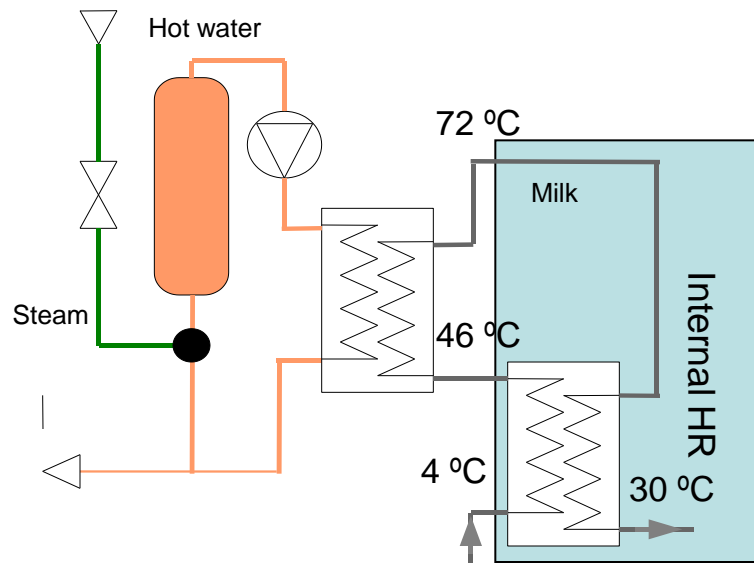
# Energieflüsse

## Definitions 11

✓ **Prozessnutzwärme (UPH): NETTO u. BRUTTO**

$$Q_{UPH, gross} = Q_{UPH} + Q_{HX, internal, Proc}$$

$Q_{HX, internal, Proc}$  = interne Wärmerückgewinnung



**Beispiel:  
Pasteurierungs-  
prozess mit interner  
Wärmerückgewinnung**

# Energieflüsse

## Definitions 12

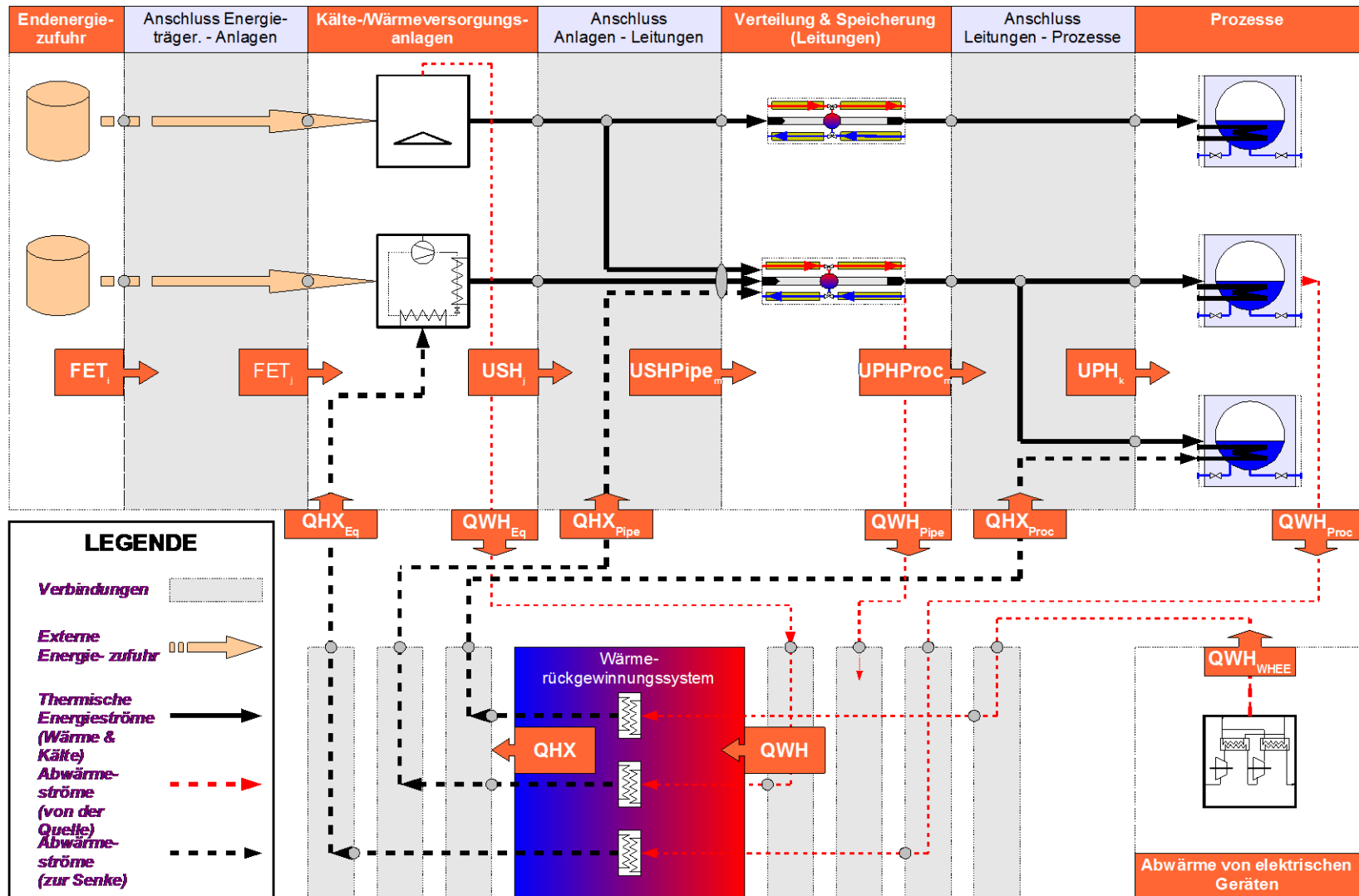
### ✓ Netto-Prozessnutzwärme (UPH)

$$Q_{UPH} = Q_{UPH, Proc} + Q_{HX, Proc}$$

$Q_{UPH, Proc}$  = externe Prozesswärme, die dem Prozess über das Wärmeversorgungssystem zugeführt wird

$Q_{HX, Proc}$  = externe Prozesswärme, die dem Prozess über das externe Wärmerückgewinnungssystem zugeführt wird

# Energieflüsse



# Temperaturniveaus in der Wärmeversorgung

- Wärmerückgewinnung und Wärmeintegration
- Verwendung effizienterer Technologien bei niedrigeren Temperaturen
- Größere Umwandlungseffizienz und geringere Wärmeverluste

sind abhängig von der

✓ **QUALITÄT** der Energie

➔ **TEMPERATUR** der erforderl. Energie



# Temperaturniveaus in der Wärmeversorgung

*Klassifizierung der Technologien zur Wärmeversorgung nach Temperaturniveaus*

Temperaturintervall (° C)	Temperaturniveau	Anwendbare Wärmeversorgungstechnologien
< 60	Niedrig	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Niedertemperatur-Wärmepumpen</li> <li>•Niedrigtemperatur-Solarthermie</li> </ul>
< 90	Mittel-Niedrig	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Abwärme von KWK (Kühlwasser)</li> <li>•Grenze für Solar-Flaschkollektoren</li> <li>•Hochtemperatur-Wärmepumpen</li> </ul>
< 150	Mitte	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Niederdruckdampf</li> </ul>
< 250	Mittel-Hoch	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Grenze für Mitteltemperatur-Solarthermie</li> </ul>
< 400	Hoch	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Grenze für Abwärme von Gasturbinen, Biomasse, etc.</li> </ul>

# Temperaturniveaus in der Wärme- und Kälteversorgung

## Definitionen 13

### ✓ **Prozesstemperatur** (*PT – process temperature*)

Temperatur des Arbeitsmediums in einem Prozess

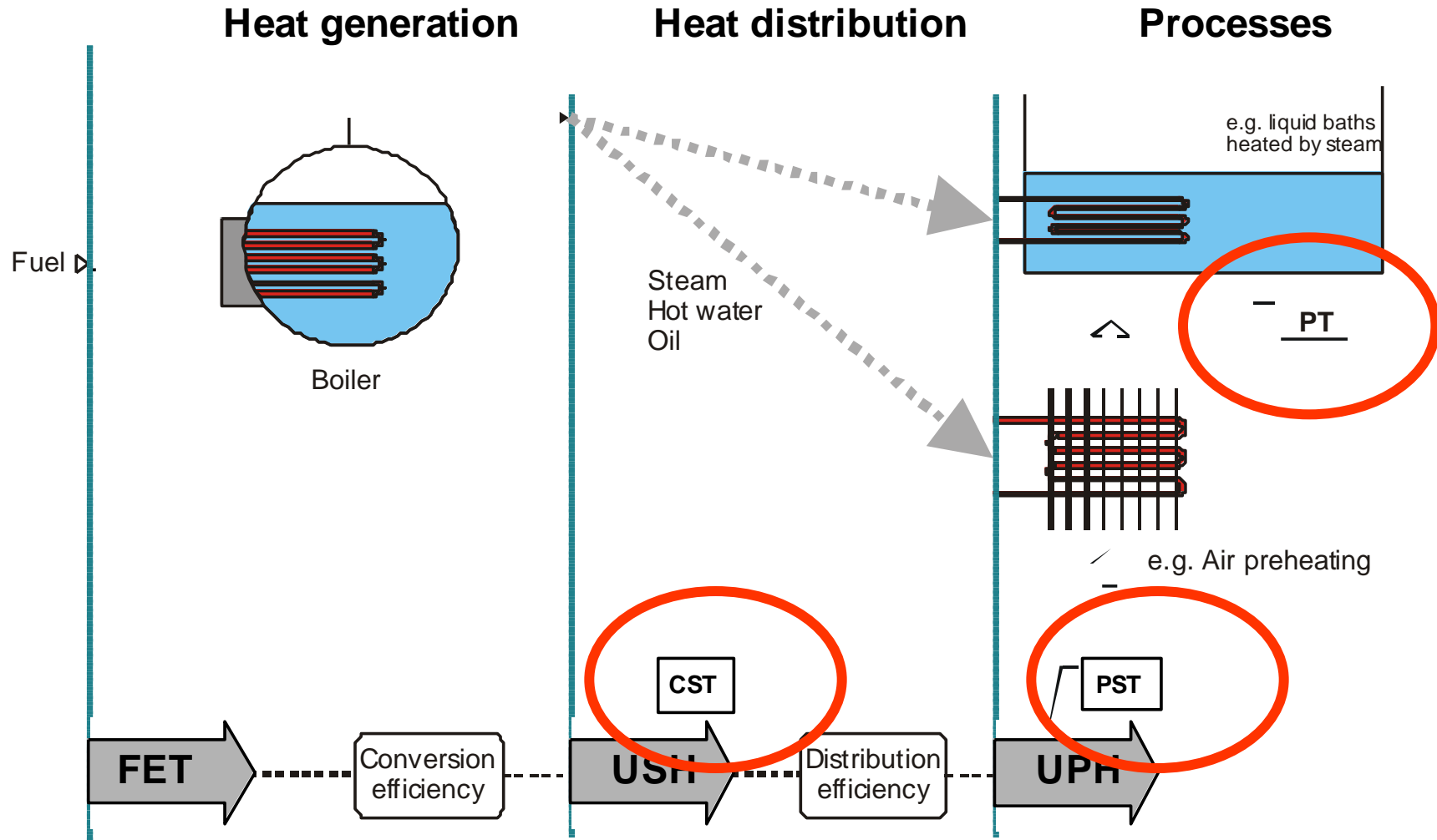
### ✓ **Prozesszufuhrtemperatur** (*PST – process supply t.*)

Eintrittstemperatur des Wärmeträgers zur Erwärmung oder Kühlung des Prozesses

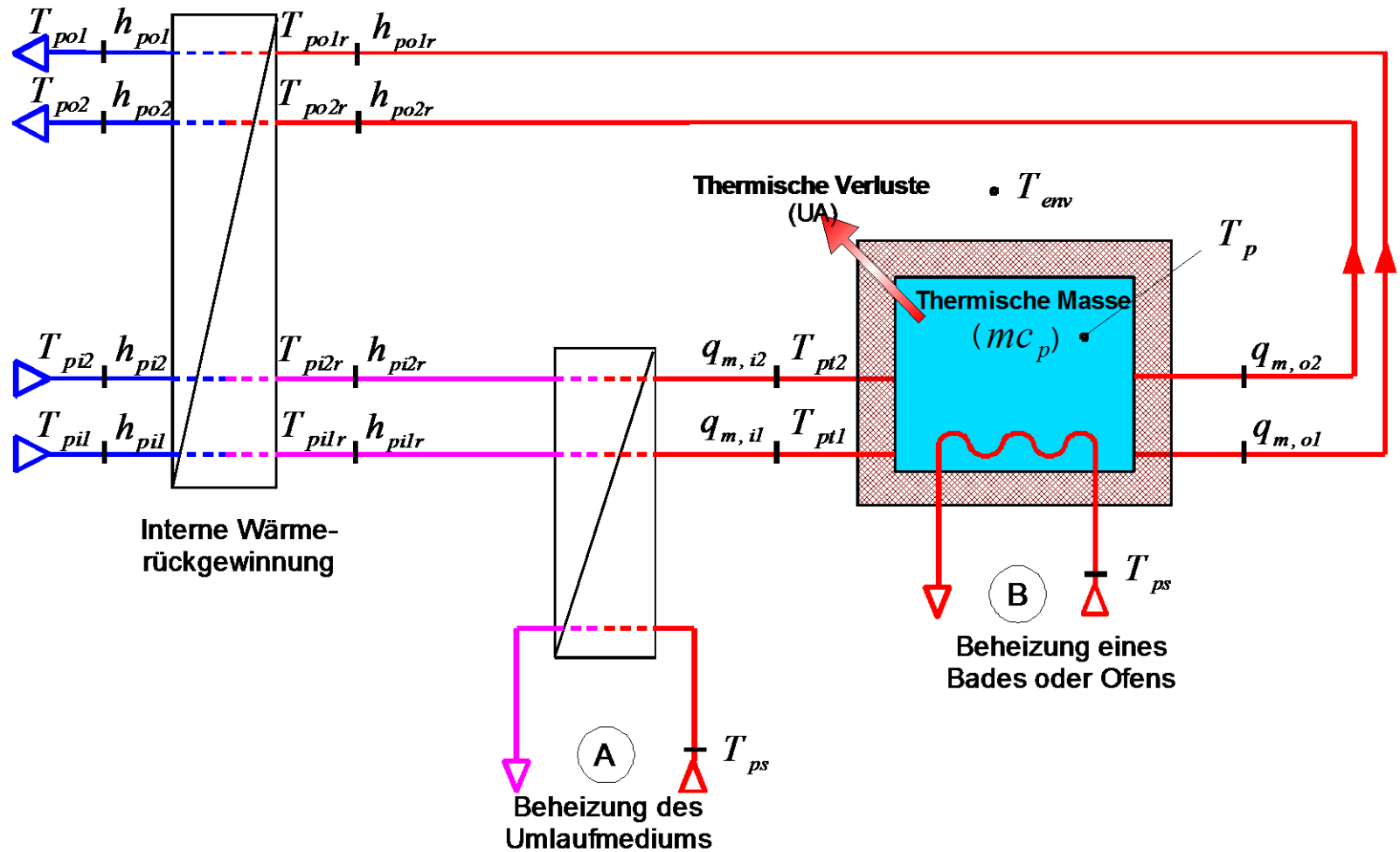
### ✓ **Zentrale Zufuhrtemperatur** (*CST – central supply t.*)

Temperatur des Wärmeträgers beim Austritt aus dem zentralen Wärme- oder Kälteerzeuger (Heizkessel, Kälteanlage).

# Temperaturniveaus in der Wärmeversorgung



# Prozessmodell



# Prozessmodell

## Teile des gesamten Prozesswärmebedarfs:

1. Zirkulationswärme ( $Q_{UPHc}$ )
2. Erhaltungswärme ( $Q_{UPHm}$ )
3. Initialheizung bei Inbetriebnahme/Start ( $Q_{UPHs}$ )

$$Q_{UPH} = Q_{UPHc} + Q_{UPHs} + Q_{UPHm}$$

# Prozessmodell

## Definitionen 14

### 1. Zirkulationswärme ( $Q_{UPHc}$ )

$$Q_{UPH,c}^{gross} = Q_{UPH,c} + Q_{HX,internal} = m_c c_p (T_p - T_{pi})$$

$$Q_{UPH,c} = m_c c_p (T_p - T_{pir})$$

# Prozessmodell

## Definitionen 15

### 2. Initialheizen bei Inbetriebnahme ( $Q_{UPHs}$ )

$$Q_{UPH,s} = N_s (m c_p)_e (T_p - T_s)$$

$(mc_p)_e$  = äquivalente thermische Masse  
(thermische Trägheit von Medium + Anlage)

### 3. Erhaltungswärme ( $Q_{UPHm}$ )

$$Q_{UPH,m} = [(UA)(T_p - T_{env}) + \dot{Q}_L] t_{op}$$

$UA$  = Koeffizient für thermische Verluste

$\dot{Q}_L$  = Energiebedarf für Phasenänderung  
(latente Wärme) oder chemische Reaktionen

# Prozessmodell

## Beispiel 1: Milcheindickung

### Prozessbeschreibung:

- ✓ Milch wird aus dem vorangegangenen Prozess mit 32 ° C übernommen und muss auf eine Prozesstemperatur von 40 ° C gebracht werden.
- ✓ 4 Stunden lang wird die Milch dann auf 40 ° C gehalten
- ✓ Am Ende des Prozesses wird das Produkt mit ca. 40 ° C aus dem Behälter genommen.

### Darstellung im EINSTEIN Prozessmodell:

- ✓ Zirkulationswärme: -> Vorheizen der Milch von 32 auf 40 ° C
- ✓ Initialheizung: keine Initialheizung, weil der Behälter am Beginn des Prozesses leer ist
- ✓ Erhaltungswärme: -> Wärmebedarf für die Erhaltung der Behältertemperatur auf 40 ° C
- ✓ Abwärme: -> in den Produkten enthaltene Wärme



# Prozessmodell

## Beispiel 1: Milcheindickung

**Processes description**

Process short name	<input type="text" value="Milk coagulation"/>	
Description	<input type="text"/>	
Process type	<input type="text" value="batch"/>	
Unit operation type	<input type="text" value="Cooking and boiling"/>	
Product or process medium	<input type="text" value="Milk"/>	
Typical (final) temperature of the process medium during operation	<input type="text" value="40.0"/>	<input type="text" value="°C"/>
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)	<input type="text" value="32.0"/>	<input type="text" value="°C"/>
Start-up temperature of process medium (after breaks)	<input type="text"/>	<input type="text" value="°C"/>
Daily inflow of process medium	<input type="text" value="100.0"/>	<input type="text" value="m3"/>
Volume of the process medium within the equipment or storage	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="m3"/>
Power requirement of the process in operation	<input type="text" value="5.0"/>	<input type="text" value="kW"/>

**Schedule**

Hours of process operation per day	<input type="text" value="12.0"/>	<input type="text" value="h"/>
Number of batches per day	<input type="text" value="3.0"/>	
Duration of 1 batch	<input type="text" value="4.0"/>	<input type="text" value="h"/>
Days of process operation per year	<input type="text" value="260.0"/>	

# Prozessmodell

## Beispiel 2: Flaschenwäsche

### Prozessbeschreibung:

- ✓ Flaschenwaschanlagen verwenden einen geschlossenen Wasserkreislauf / ein Wasserbad mit ca. 75 – 85 °C

### Darstellung im EINSTEIN Prozessmodell:

- ✓ Zirkulationswärme: -> Vorheizen der eintretenden Flasche auf Badtemperatur; Vorheizen eines kleinen Teils des Speisewassers (=> für eine erste Schnelleinschätzung: beides vernachlässigen ...)
- ✓ Initialheizung: Aufheizen des Wasserbads nach der Betriebsunterbrechung über Nacht oder Wochenenden
- ✓ Erhaltungswärme: -> Wärmebedarf für die Erhaltung des Bads auf Prozesstemperatur (ca. 80 °C)
- ✓ Abwärme: -> die in den sauberen Flaschen enthaltene Wärme

# Prozessmodell

## Beispiel 2: Flaschenwäsche

**Processes description**

Process short name	Bottle washer	
Description		
Process type	continuous	▼
Unit operation type	Cleaning of bottles and cases	▼
Product or process medium	Water	
Typical (final) temperature of the process medium during operation	85.0	°C ▼
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)		°C ▼
Start-up temperature of process medium (after breaks)	55.0	°C ▼
Daily inflow of process medium	0.0	m3 ▼
Volume of the process medium within the equipment or storage	20.0	m3 ▼
Power requirement of the process in operation	10.0	kW ▼

**Schedule**

Hours of process operation per day	14.0	h ▼
Number of batches per day	1.0	
Duration of 1 batch	14.0	h ▼
Days of process operation per year	260.0	

# Prozessmodell

## Beispiel 3: Malztrocknung

### Prozessbeschreibung:

- ✓ Malz wird in einem Warmluftstrom von ca. 60 ° C getrocknet

### Darstellung im EINSTEIN Prozessmodell:

- ✓ Zirkulationswärme: -> Vorheizen des externen Luftstroms auf 60 °C
- ✓ Initialheizung: keine zusätzliche Wärmezufuhr
- ✓ Erhaltungswärme: keine zusätzliche Wärmezufuhr, Temperatur wird durch eingeleiteten Warmluftstrom erhalten
- ✓ Abwärme: -> in der feuchten Luft enthaltene Wärme

# Prozessmodell

## Beispiel 3: Malztrocknung

**Processes description**

Process short name	<input type="text" value="Malt drying"/>	
Description	<input type="text"/>	
Process type	<input type="text" value="continuous"/>	▼
Unit operation type	<input type="text" value="Drying"/>	▼
Product or process medium	<input type="text" value="Air"/>	
Typical (final) temperature of the process medium during operation	<input type="text" value="60.0"/>	°C ▼
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)	<input type="text" value="15.0"/>	°C ▼
Start-up temperature of process medium (after breaks)	<input type="text"/>	°C ▼
Daily inflow of process medium	<input type="text" value="10 000.0"/>	m3 ▼
Volume of the process medium within the equipment or storage	<input type="text" value="0.0"/>	m3 ▼
Power requirement of the process in operation	<input type="text" value="0.0"/>	kW ▼

**Schedule**

Hours of process operation per day	<input type="text" value="24.0"/>	h ▼
Number of batches per day	<input type="text" value="1.0"/>	
Duration of 1 batch	<input type="text" value="24.0"/>	h ▼
Days of process operation per year	<input type="text" value="350.0"/>	

# Annahmen im Modell

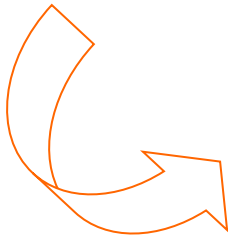
---

- ✓ Konstante Temperaturniveaus  
Eintritts-, Prozess- (Vorgabe) und  
Abwärmemetemperatur konstant
- ✓ Zeitabhängigkeit:
  - gleicher Zeitplan für alle eintretende Flüsse
  - gleicher Zeitplan für alle austretenden Flüsse
  - alle Bestandteile der Prozesswärme variieren proportional

# Bedarfsprofil

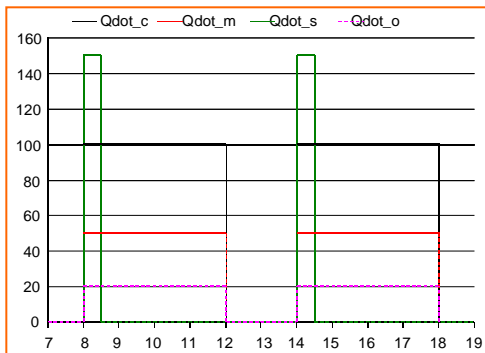
Prozesse sind:

- ✓ kontinuierlich
- ✓ Batch-Prozesse



Zeitabhängigkeit des Wärmebedarfs und der Abwärmeverfügbarkeit:

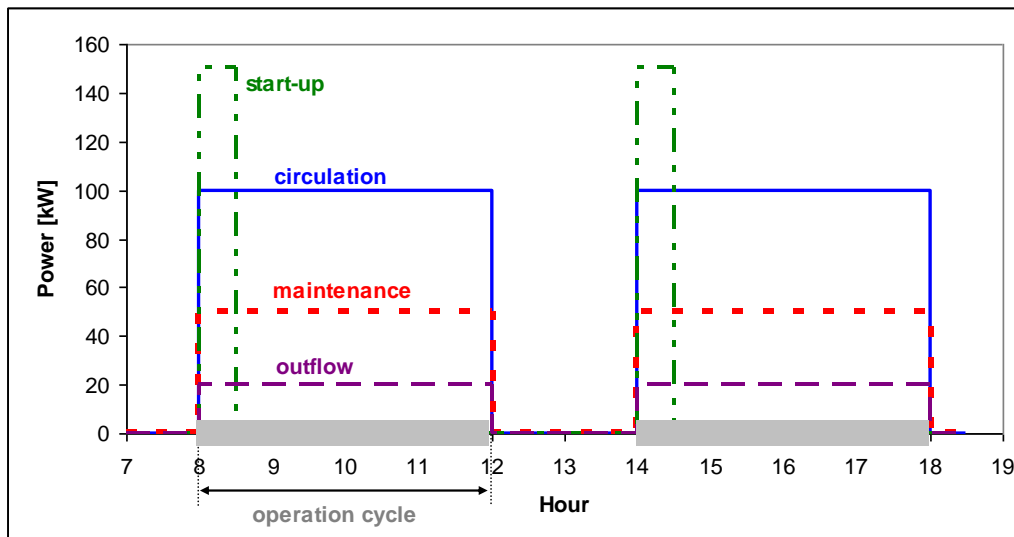
- ✓ Zeitplan für eintretende Flüsse
- ✓ Zeitplan für Initialheizung bei Inbetriebnahme
- ✓ Zeitplan für die Prozessdurchführung
- ✓ Zeitplan für austretende Flüsse



# Bedarfsprofil

## Standard-Prozesszeitplan: kontinuierlicher Prozess

	Kontinuierlicher Prozess
Zirkulation (Eintritt)	Kontinuierlich in $t_{op}$
Inbetriebnahme	Die ersten 20 % der Gesamtdauer <u>innerhalb</u> $t_{op}$
Erhaltung	Kontinuierlich in $t_{op}$
Abfuhr des Überschussstroms (Austritt)	Kontinuierlich in $t_{op}$

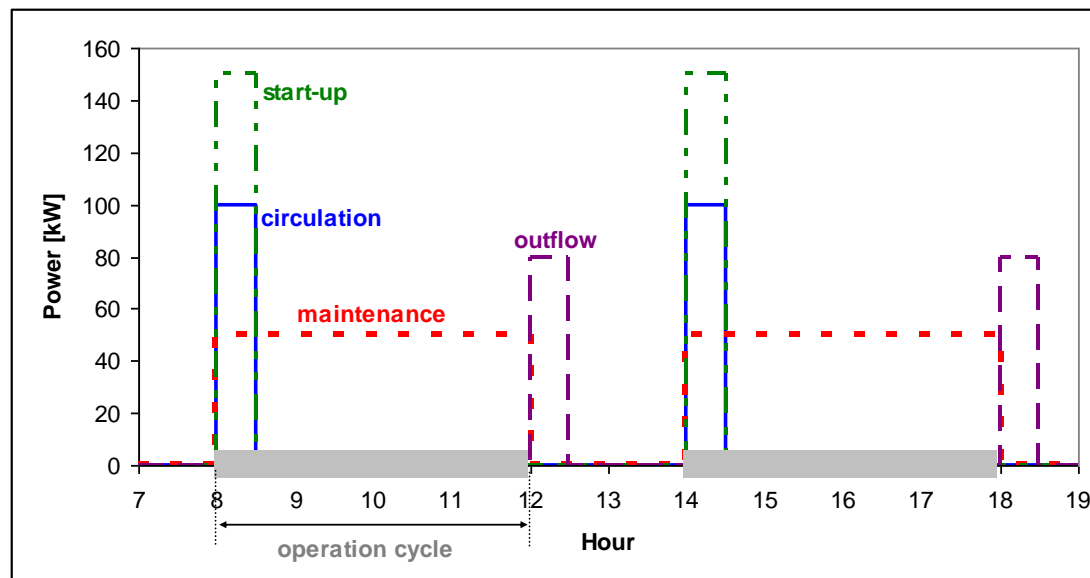




# Bedarfsprofil

## Standard-Prozesszeitplan: Batch-Prozess

	Batch-Prozess
<b>Zirkulation (Eintritt)</b>	Die ersten 20 % der Gesamtdauer <u>innerhalb</u> $t_{op}$
<b>Inbetriebnahme</b>	Die ersten 20 % der gesamtdauer <u>innerhalb</u> $t_{op}$
<b>Erhaltung</b>	Kontinuierlich in $t_{op}$
<b>Abführen des Überschussstroms (Austritt)</b>	Die ersten 20 % der Gesamtdauer <u>nach</u> $t_{op}$



# Gebäude in EINSTEIN

## Gebäude Energiebedarf in EINSTEIN wird als Prozess modelliert

Prozessbedarfs-Bestandteil	Raumwärme	Raumkühlung	Warmwasser
Zirkulation (Eintritt)	Aufwärmen von Frischluft	Kühlen von Frischluft Entfeuchten von Frischluft	Aufwärmen von Kaltwasser
Inbetriebnahme	Erstmaliges Aufwärmen/AbkühlenInitial vor Zeitperioden mit Belegung		-
Erhaltung	Energiebedarf für Wärme/Kühlung ausgenommen zur Lüfterneuerung		-
Abführen des Überschussstroms (Austritt)	Abluft (für WRG nur bei kontrollierter Belüftung anwendbar)		Abwasser
Prozess-Temperatur	Gewünschte Innentemperatur		Heißwassertemperatur (beim Verbraucher)
Prozess-Zufuhrtemperatur	Eingangstemperatur des Wärmeträgers in Wärme- oder Kältesystem (z.B. Wasser, heiße oder kalte Luft)		Heißwassertemperatur (Verteilung)