
MODUL 2.1

Energieeffizienz in EINSTEIN

Prozessoptimierung

und

Wärmerückgewinnung

Erstellung eines Konzepts der Einsparmöglichkeiten und erste Definition der Energieziele

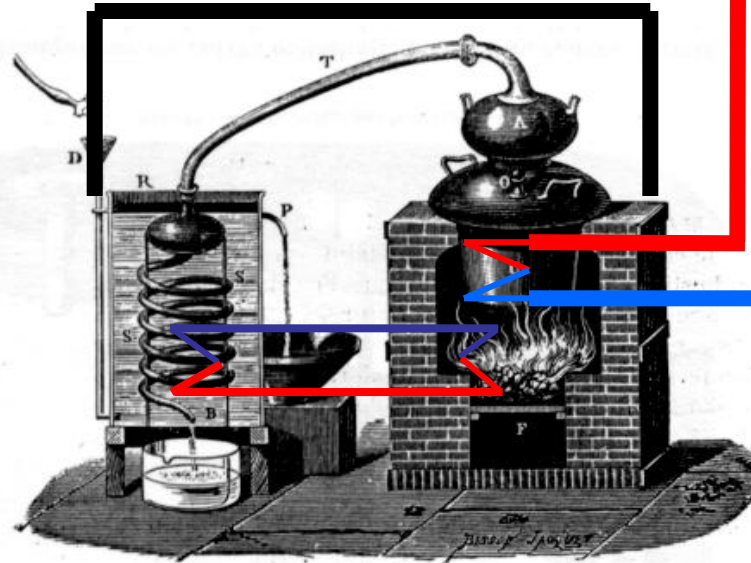
EINSTEIN denkt logisch,
daher wird zuerst Energie gespart!

- ✓ beim Bedarf
- ✓ bei der Versorgung

SCHRITT 7: Erstellung eines Konzepts der Einsparmöglichkeiten und erste Definition der Energieziele



Kühlsystem



Destillation

Prozessoptimierung



Erneuerbare Energie



Heizsystem

SCHRITT 7: Erstellung eines Konzepts der Einsparmöglichkeiten und erste Definition der Energieziele

Schritte zum Energiesparen:

1. Verringerung des Prozesswärmebedarfs durch **Prozessoptimierung**
2. Verringerung des Wärmeversorgungsbedarfs durch **Wärmerückgewinnung und Prozessintegration**
3. KWK und Polygeneration
4. Energieeffiziente Versorgungstechnologien und erneuerbare Energien **exergetisch gesehen**

SCHRITTE 7.1 und 7.2: Prozessoptimierung und Einsparungen auf Nachfrageseite

✓ ZIEL

- Energetische Verbesserungen beim Produktionsprozess
- Verbesserung des Energiebedarfs von Gebäuden

✓ Quellen für Energieeffizienz-Maßnahmen

- BVT-Referenzdokumente (BREFs)
- EINSTEIN Bericht „*Energy Auditing Practices and Tools*”
- Einstein Prozessoptimierung **Datenbank...**

SCHRITTE 7.1 und 7.2: Prozessoptimierung und Einsparungen auf Nachfrageseite

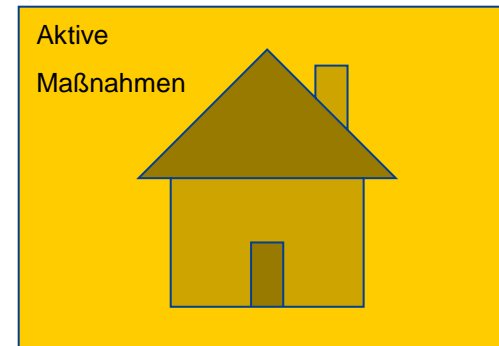
..eine **Datenbank** für Energieeffizienz

- ✓ Allgemeine Einsparungsmaßnahmen / -methoden
 - z.B. Einsatz von Waschwasser in Kaskade usw.
- ✓ Verschiedene Technologien für 1 Grundoperation
 - z.B. Eindampfung – thermische/mechanische Brüdenverdichtung, Vakuumverdampfung usw.
- ✓ Effizienzmaßnahmen für spezifische Technologien
 - z.B. Abwärmerückgewinnung, optimierte Steuerung beim Trocknen
- ✓ Anwendbarkeit von Technologien/Maßnahmen in verschiedenen Bereichen
 - Synergien zwischen Lösungen aus unterschiedlichen Bereichen ermöglichen

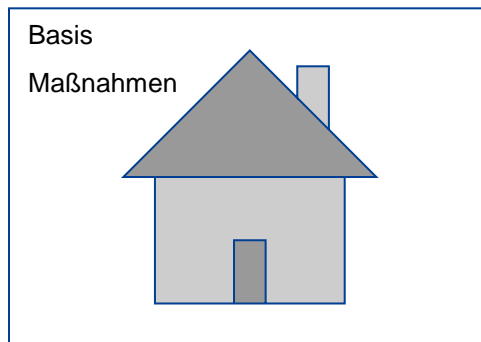
Schritte 7.1 and 7.2: Prozessoptimierung für Gebäude

- **EINSTEIN** nutzt Gebäudewärmebedarf als Ausgang für Systemoptimierung
- Bezügliche Gebäuden, der Techn. Gebäudeausstattung und den Anwendern kann zwischen einfachen (Basis-) und aktiven Maßnahmen unterschieden werden

- ✓ Optimierte Heizsysteme
- ✓ Anwendung von Erneuerbaren Energiequellen
- ✓ Optimierte Heizkontrollsysteme
- ✓ Optimiertes Lüftungssystem
- ✓ Beeinflussung des Nutzerverhaltens



Beziehen sich auf Gebäude, Techn. Ausstattung und Nutzer



Beziehen sich auf Gebäude

- ✓ Vollständige Außendämmung
- ✓ Thermisch optimierte Fenster u. Türen
- ✓ Luft-Dichtheit
- ✓ Externe Beschattung
- ✓ Natürliche Kühlung

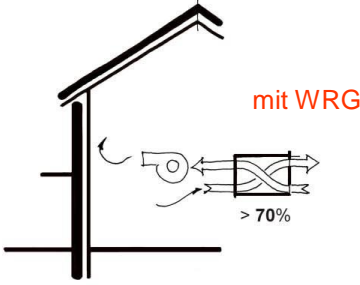
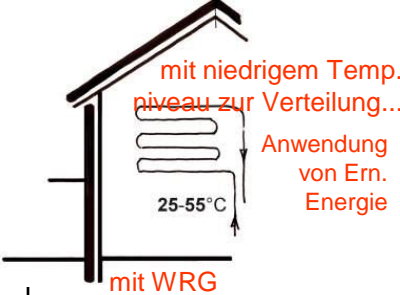
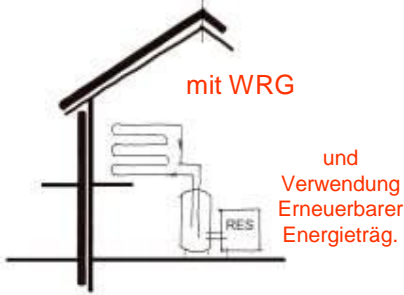

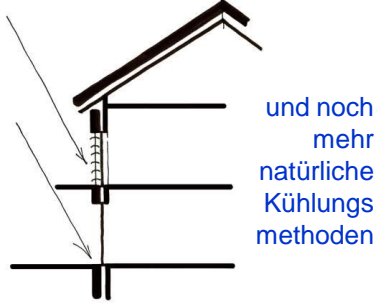
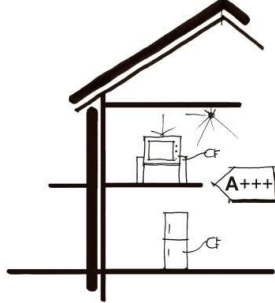
Schritte 7.1 and 7.2: Prozessoptimierung und Gebäude

Die Klimazonen in der EU können zwischen warmen, gemäßigt und kühlen unterschieden werden, abhängig von:

- ✓ **Niedrigste und durchschnittliche Außentemperatur während der Heizperiode**
- ✓ **Durchschnittliche Außentemperatur im Sommer**
- ✓ **Heizgradtage**
- ✓ **Solarstrahlung**

STEP 7.1 and 7.2: Prozessoptimierung und Gebäude

...für Heizung und Kühlung in versch. Klimazonen

...betreffen*	W Warm	T Gemäßigt	C Kühl
Heizen	<p>Dämmung, Luftdichtheit, optimiertes Belüftungs- und Heizsystem</p>  <p>mit WRG > 70%</p>	<p>Dämmung, Luftdichtheit, optimiertes Belüftungs- und Heizsystem</p>  <p>mit niedrigem Temp. niveau zur Verteilung... 25-55°C Anwendung von Ern. Energie mit WRG</p>	<p>Dämmung, Luftdichtheit, optimiertes Belüftungs- und Heizsystem</p>  <p>mit WRG und Verwendung Erneuerbarer Energieträg.</p>
Kühlen	<p>natürliche Kühlung, externe Beschattung, Nutzerverhalten und optimierte Belüftung</p>  <p>mit freier Kühlung</p>	<p>externe Beschattung, Nutzerverhalten</p>  <p>und noch mehr natürliche Kühlungs methoden</p>	<p>Nutzerverhalten und externe Beschattung</p>  <p>A+++</p>

* Source: AEE INTEC, verified by SQUARE partners

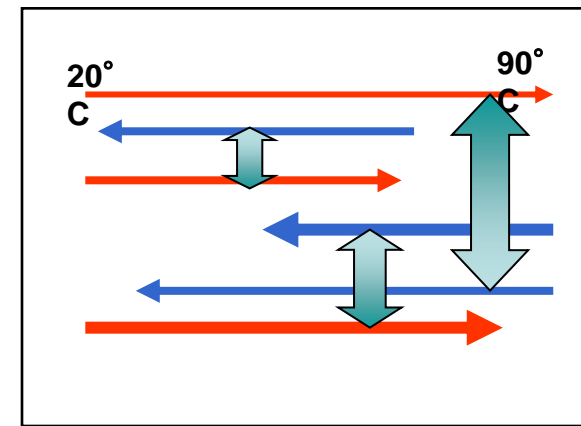
Schritte 7.2 und 7.3: theoretisches WRG-Potenzial und Vor-Entwurf für WT und Wärmespeicher

7.3. Potenzial für Wärmerückgewinnung

- ✓ Analyse eines minimalen externen Wärme- und Kältebedarfs
- ✓ Potential für Wärmerückgewinnung

7.4. Planung des Wärmetauschernetzwerkes

- ✓ Planung und Optimierung eines Wärmetauschernetzwerkes
- ✓ Verringerung von Wärmebedarf und notwendigen Temperaturniveaus -> Basis für exergetisch optimierte Kälte- und Wärmeintegration



Schritte 7.2 und 7.3: theoretisches WRG-Potenzial und Vor-Entwurf für WT und Wärmespeicher

Stellung des Entwurfs des Wärmerückgewinnung- Systems innerhalb der Audit-Methode:

- ✓ Vor dem Entwurf des neuen Energieversorgungssystem
- ✓ Mögliche erneute Berechnung mit dem neuen Versorgungssystem
- ✓ Energieströme aus neuer Wärme/Kalterzeugungs-Anlage könnten sich ändern

Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential

✓ Ziel:

Theoretisches Energiesparpotential durch Wärmerückgewinnung (vor Planung des Energieversorgungssystems)

- Brennstoffsparen und Überdimensionierung der Versorgungsanlagen vermeiden

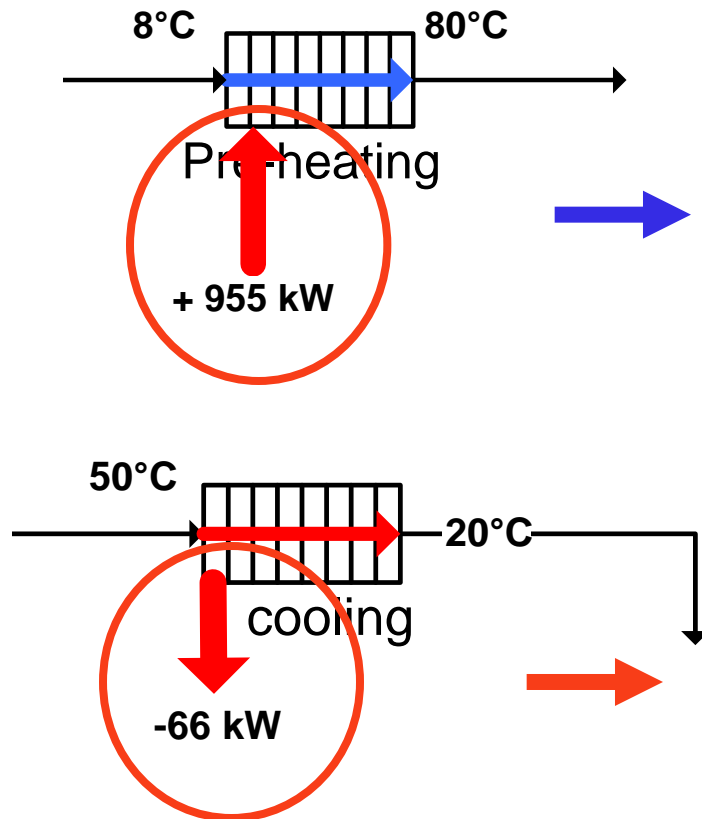
✓ Methode:

- Von Energieversorgung und Prozessen zu „Strömen“
- Pinch-Analyse
 - Wärme- und Kälteverbundkurven
 - Gesamtverbundkurve

✓ Ergebnis:

- Theoretisches Wärmerückgewinnungspotential
- Notwendige externe Wärme-/Kälteversorgung auf verschiedenen Temperaturniveaus

Schritt 7.3: Theoretisches Wärmerückgewinnungspotential



„**Kalte Ströme**“ müssen beheizt werden

Jeder Prozess der **Energiezufuhr** zum **Beheizen** des Prozessflusses/-stroms benötigt

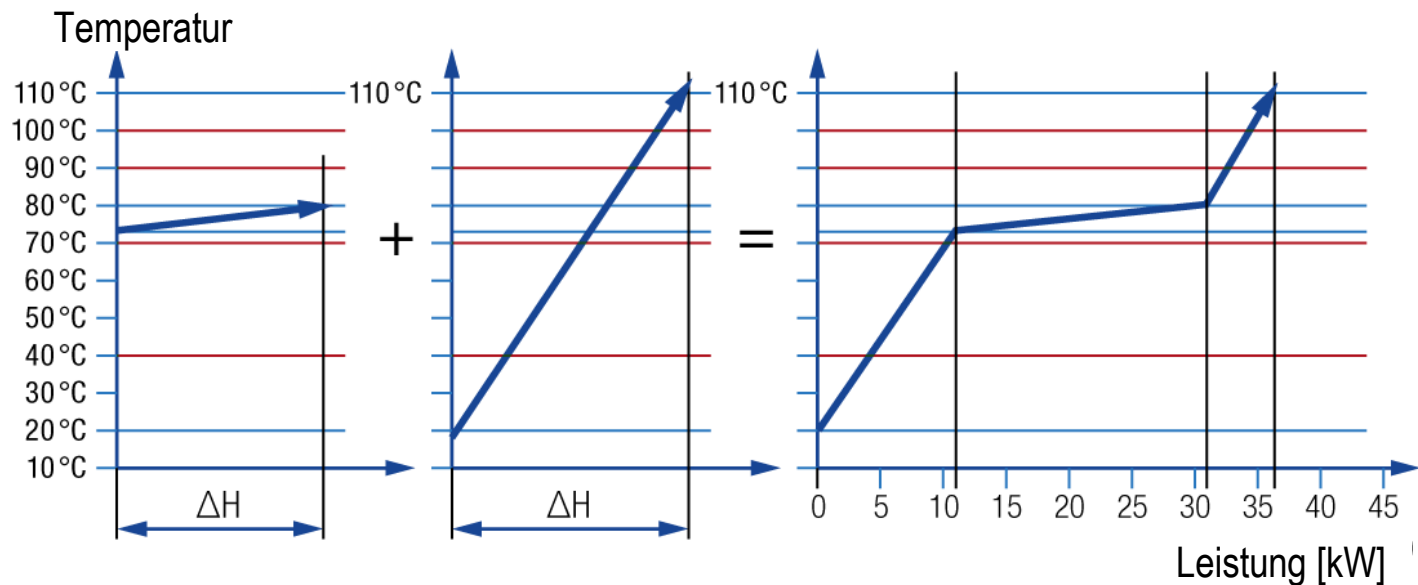
„**Heiße Ströme**“ müssen gekühlt werden

Jeder Prozess, der **Energiezufuhr** zur **Kühlung** des Prozessflusses/-stroms benötigt

Schritt 7.3: Theoretisches Wärmerückgewinnungspotential

✓ Verbundkurven:

Addition von Vektoren die den Energiebedarf als Funktion von Leistung und Temperatur (= Energieströme) darstellen.

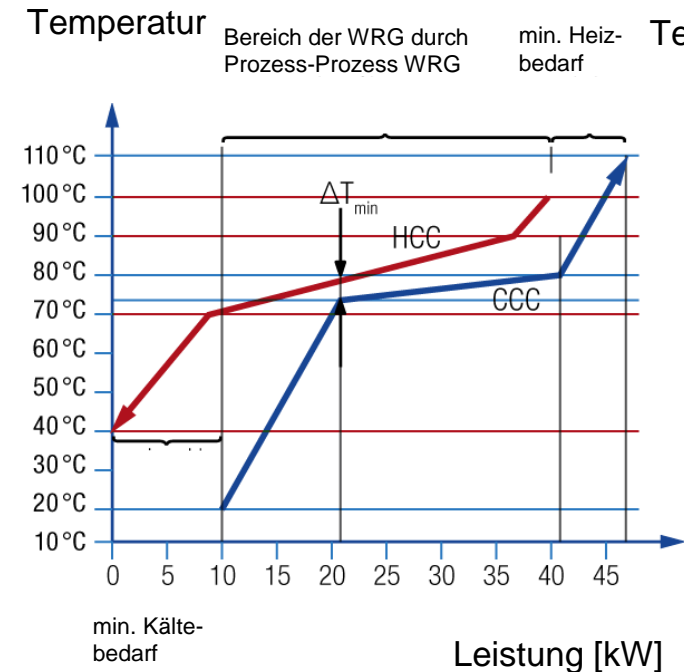


Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential

✓ Wärme- u. Kälteverbundkurven

✓ Pinch-Temperatur – Teilung des Produktionsprozesses in zwei Hälften:

- Oberhalb des Pinch – keine Kühlung erforderlich
- Unterhalb des Pinch – keine Heizung erforderlich
- Über den Pinch sollte kein Wärmeaustausch erfolgen (effiziente thermodynamische Energienutzung)

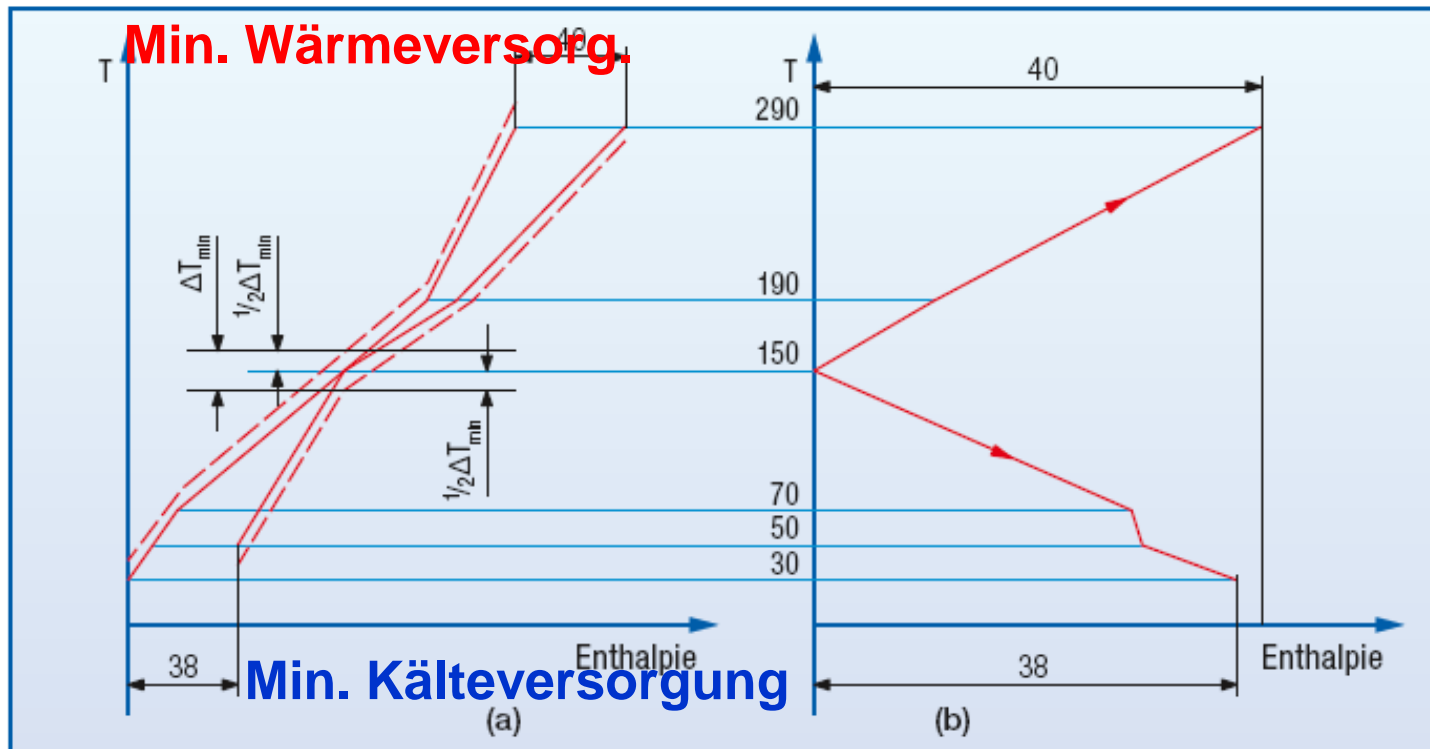


Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential

✓ Gesamtverbundkurve (GCC)

✓ zeigt

- die ideale externe Energieversorgung, die für die Beheizung oder Kühlung von Strömen erforderlich ist.
- das Temperaturniveau für die Zufuhr der externen Energie.

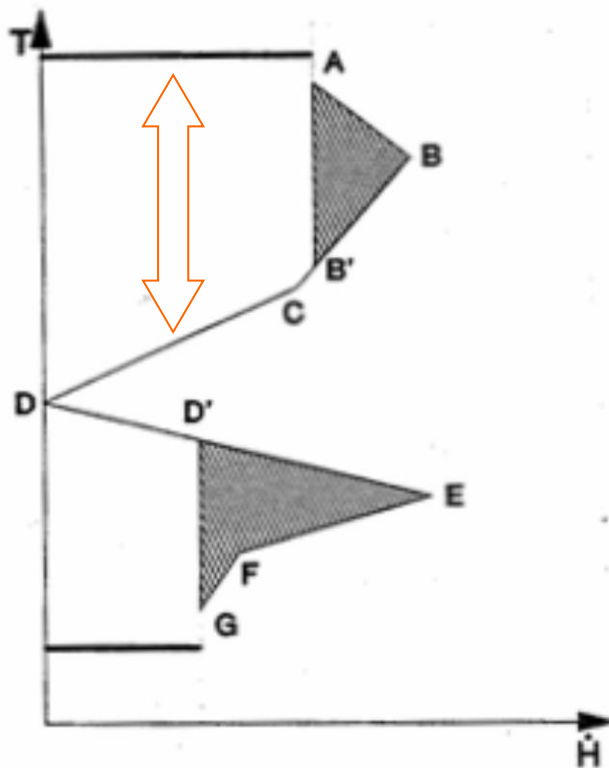


Schritt 7.3: Theoretisches Wärmerückgewinnungspotential

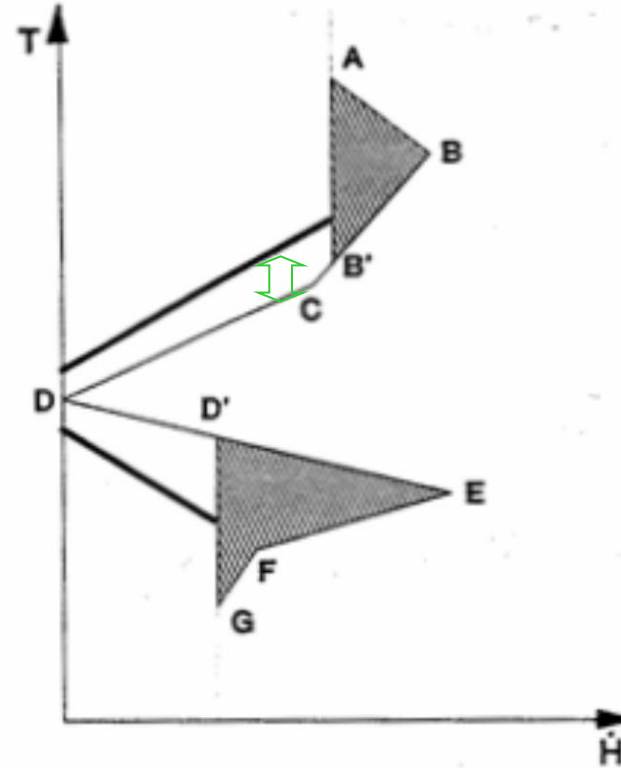
✓ Gesamtverbundkurve (GCC) und Wärmezufuhr

(a) Große Energieverluste

(b) ideales Temperaturniveau



(a)



(b)

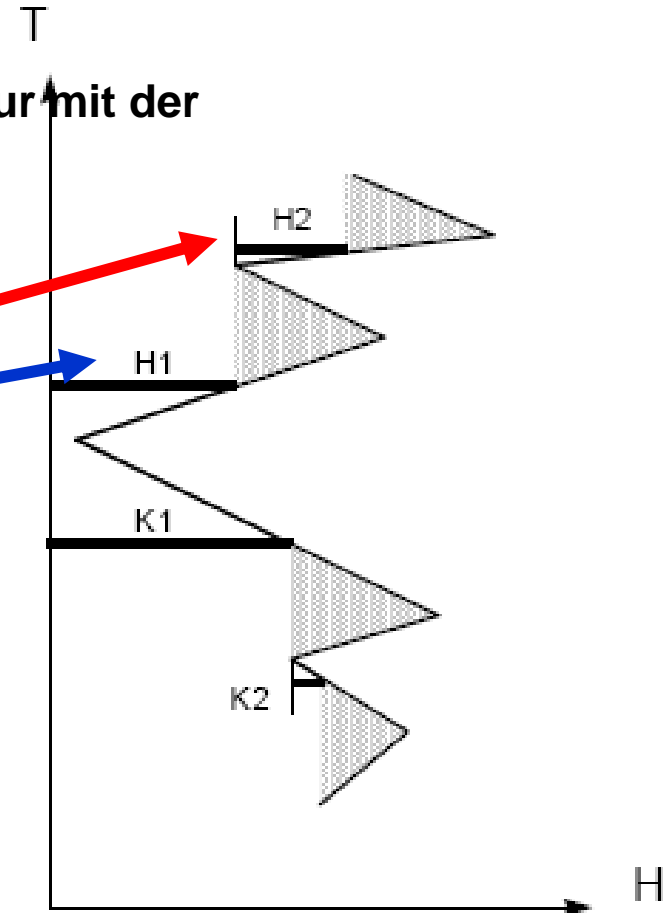
Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential

✓ Gesamtverbundkurve (GCC) und Wärmezufuhr

Annäherung an die ideale Temperatur mit der
Wärmeversorgungskaskade :

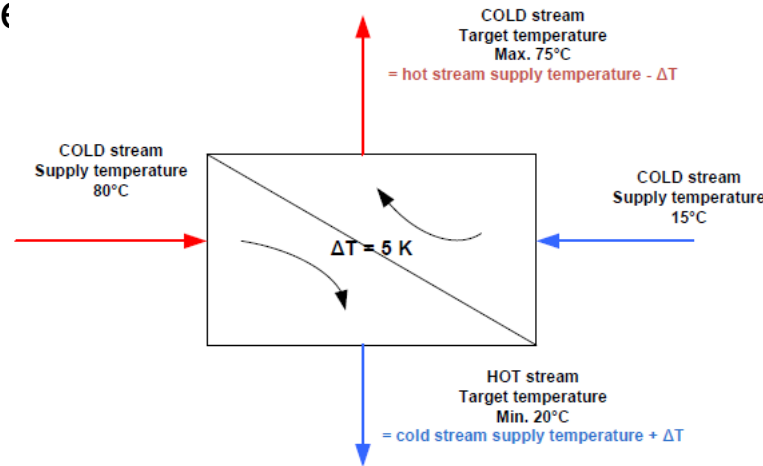
H2: Wärmezufuhr bei
hoher Temperatur

H1: Wärmezufuhr bei
niedriger Temperatur



Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential

- ✓ Wahl von ΔT_{\min} für einen ersten Entwurf
 - ✓ In einem Gegenstrom-Wärmetauscher kann die Endtemperatur des kalten Stroms maximal die Ausgangstemperatur des heißen Stroms minus ΔT_{\min} erreichen
 - ✓ In einem Gegenstromwärmetauscher kann die Endtemperatur des heißen Stroms maximal die Ausgangstemperatur des kalten Stroms minus ΔT_{\min} erreichen

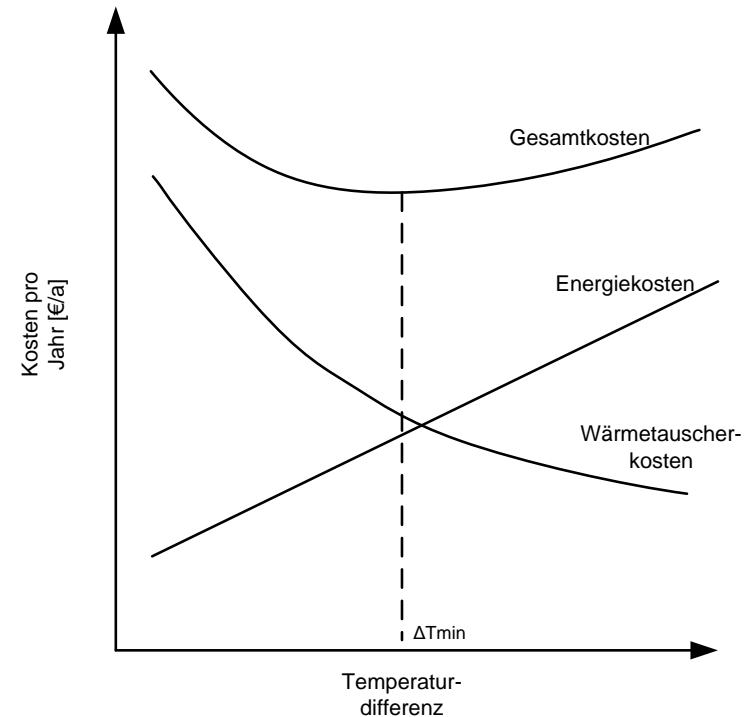


$$H[kW] = m_{hs} * c_{p_{hs}} * (T_{supply_{hs}} - T_{target_{hs}}) = m_{cs} * c_{p_{cs}} * (T_{target_{cs}} - T_{supply_{cs}})$$

Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential

✓ Wirtschaftl. Optimierung

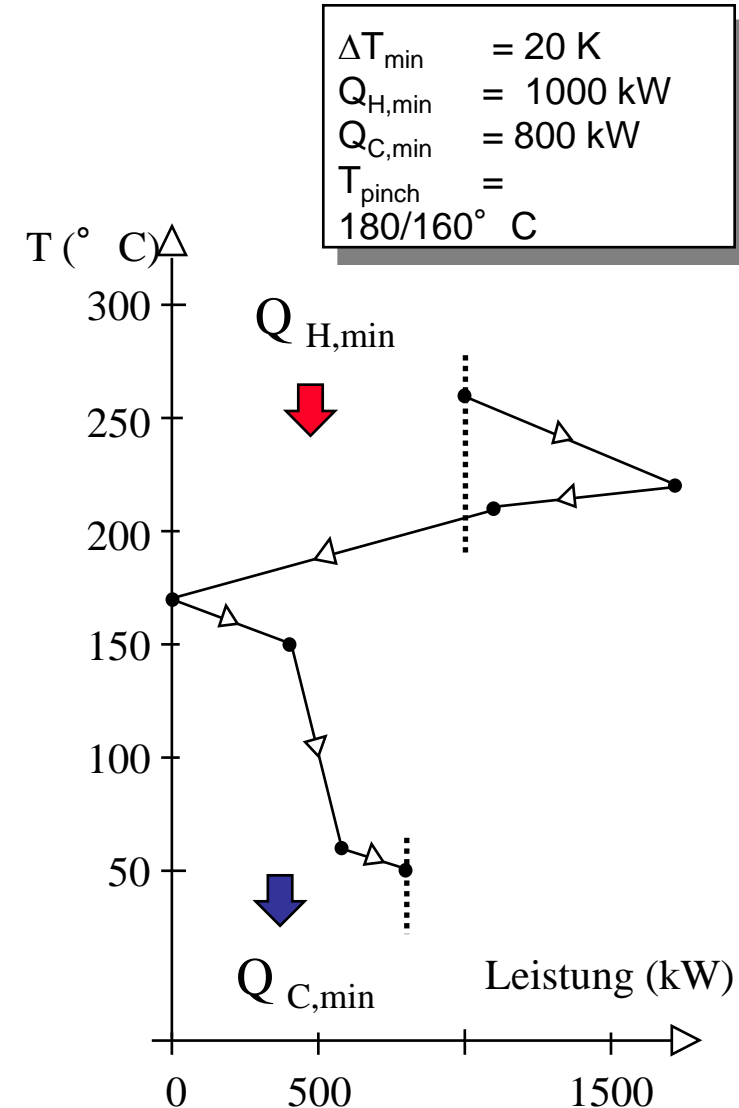
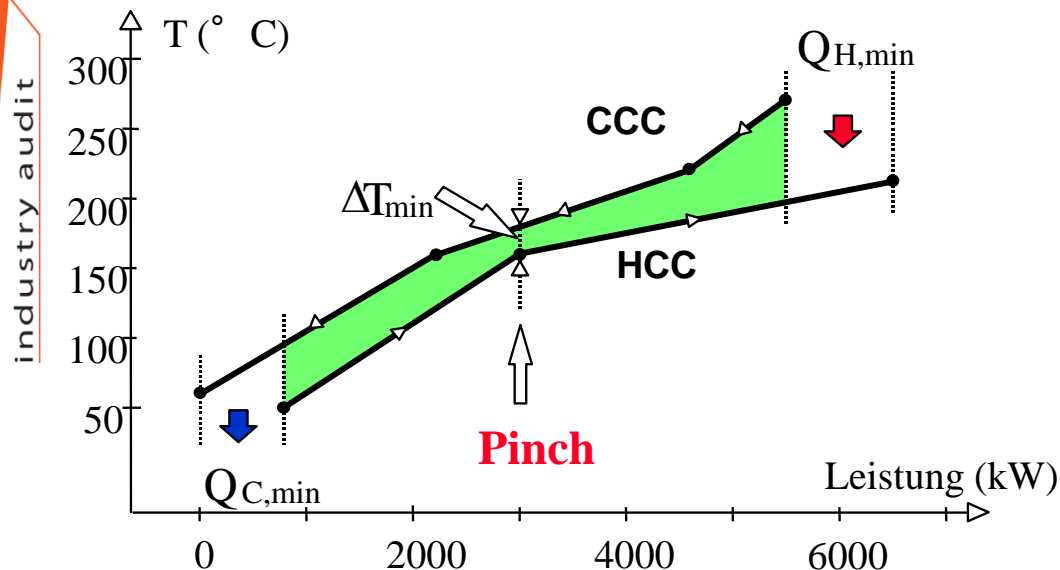
- ✓ Investitionskosten:
Wärmetauscherfläche,
Temperatur, Druck, Material des
Wärmetauschers, Anschlüsse etc.
- ✓ Energieeinsparung:
Wärmetransferkoeffizient
(Eigenschaften des Flusses,
Parameter des Mediums, Material
etc.), **logarithmische Temperatur-
differenz** zwischen den Flüssen,
Wärmetauscherfläche



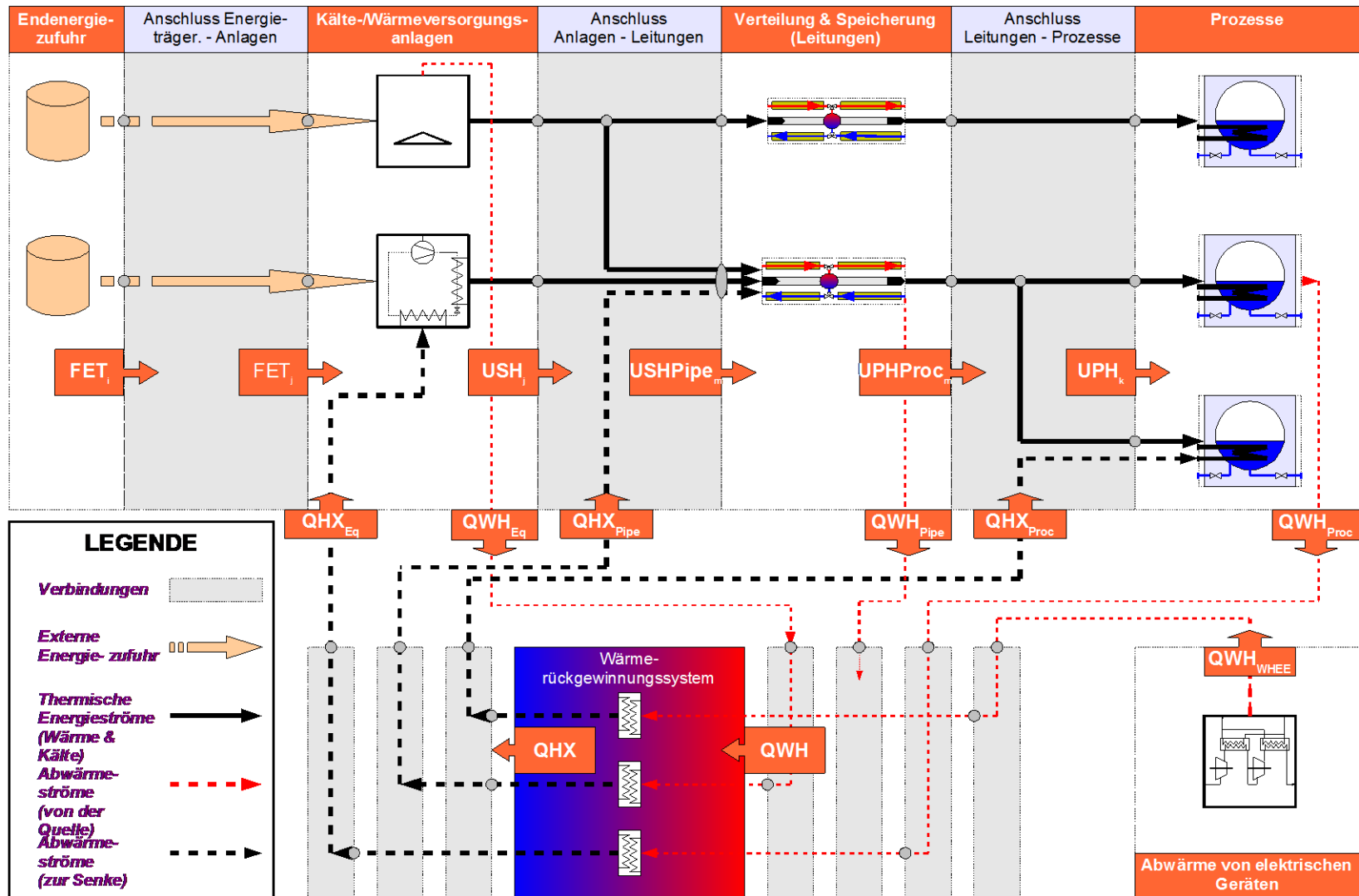
Wärmerückgewinnungspotential

✓ Pinch-Analyse

- Wärme- und Kälteverbundkurve
- Gesamtverbundkurve



Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential



Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential

Die folgenden Enthalpieströme werden in der Pinch-Analyse verwendet (die Liste ist nicht vollständig):

✓ Prozesse

- Inbetriebnahme-Strom (Aufheizen bei Inbetriebnahme)
- Zirkulationsströme (Heizen und einströmendes Medium)
- Erhaltungsströme (Verluste und Verdampfung)
- Abwärmeströme
 - Heiße Produkte
 - Heißes Abwasser
 - Dampf
 - Etc.

Schritt 7.3: Theoret. Wärmerückgewinnungspotential

Die folgenden Enthalpieströme werden in der Pinch-Analyse verwendet (die Liste ist nicht vollständig):

✓ Verteilleitung

- Kondensat
- Abwärme von Leitungen (Heißluft, heißes Abwasser, ...)
- Kesselspeisewasser-Vorwärmung
- Etc.

✓ Anlagen

- Kessel
 - Abgas
 - Verbrennungsluft
- Abwärme von Kälteanlagen
- Wärmbedarf von Wärmepumpen
- Etc.

✓ Elektrische Anlage

- Abwärme von elektr. Kompressoren

Schritt 7.3: Theoretisches Wärmerückgewinnungspotential

✓ Von Energieversorgung und Prozessen zu Strömen

✓ Prozess = Waschen

- Behältervolumen: 5 m³
- Temperatur des kalten Wassers = 10° C
- Prozesstemperatur = 60° C
- Kaltwasserzufuhr = 10 m³/Tag
- Wärmezufuhr während des Betriebs (Wärmen des eingespeisten Wassers und thermische Verluste, Verdampfung vernachlässigbar) = 90 kW
- Betriebszeiten:
 - Inbetriebnahme: 6:00-6:30
 - Kontinuierlicher Betrieb: 6:30-16:00
- Abwassertemperatur = 50° C
- Temperatur, auf die das Abwasser abgekühlt werden kann: 5° C.

Schritt 7.3: Theoretisches Wärmerückgewinnungspotential

✓ Von Energieversorgung und Prozessen zu **Strömen**

✓ Prozess = Waschen

➔ **Enthalpieströme**

Name	Start-Temp. ° C	End-Temp. ° C	Mengen- durchfluss kg/h	Nötige Leistung/ Abwärme kW	Betriebs- zeiten
Inbetriebnahme	10	60	10.000	582	6:00-6:30
Wärmen des ständigen Wasserzuflusses	10	60	1.053	61	6:30-16:00
Zusätzliche Wärmezufuhr während des Betriebs wg therm. Verluste	60	60	-	29	6:30-16:00
Abwasser	50	5	1.053	55	6:30-16:00
Abwasser nach Maschinenstopp	50	5	10.000	524	16:00 -16:30

Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks

✓ Ziel

- ✓ Wärmeintegration mit ganzheitlichem Ansatz
- ✓ Planung eines Wärmetauschernetzwerks

✓ Methode

- Entwurf des Wärmetauscher-Netzwerkes basierend auf der Pinch-Analyse
- Wärmetauschernetzwerk-Simulation

✓ Ergebnisse

- ✓ Wärmetauschernetzwerk
- ✓ Entsprechende Energiebedarfskurven und -verfügbarkeitskurven (jährlicher Energiebedarf, Temperaturniveaus)

Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks

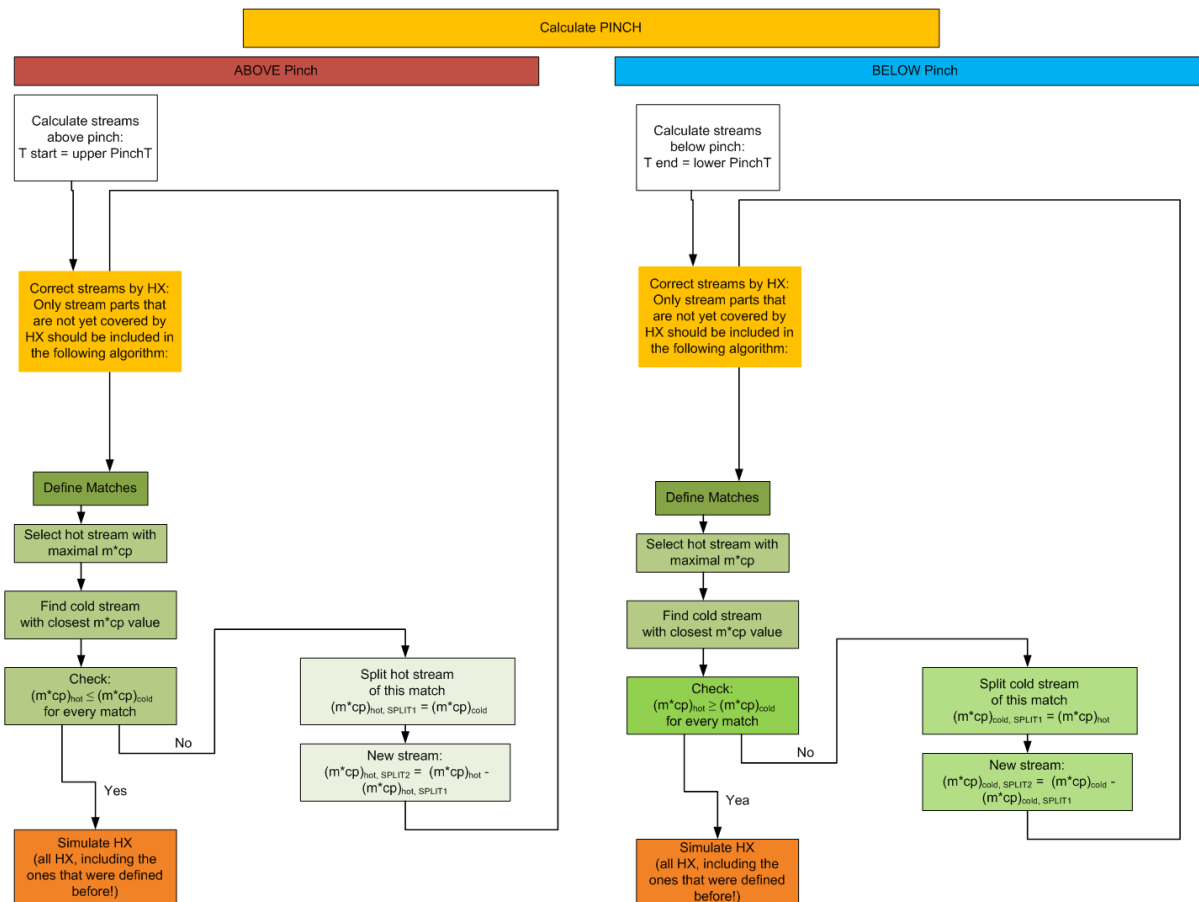
Allgemeine Kriterien für WT-Netzwerk:

- ✓ Verwendung von Wärme auf einem bestimmten Temperaturniveau für das Erwärmen von anderen Strömen auf ein ähnliches Temperaturniveau
- ✓ Leistung des Wärmetausches
- ✓ Gesamte über die Wärmetauscher übertragbare Energie
- ✓ Wärmeintegration innerhalb desselben Prozesses ist bevorzugt zu behandeln – direkte Verwendung von Abwärme
- ✓ Verwendung von Wärme, die von einem Kühler gekühlt werden müsste, für einen Wärmeprozess erhöht Energieeinsparungen durch Wärmetausch, da die externe Wärmezufuhr für Wärmequelle und Wärmesenke eingespart werden kann
- ✓ Entfernung zwischen der Wärmequelle (heißer Strom) und der Wärmesenke (kalter Strom)
- ✓ Praktische Probleme wie Verschmutzungen, Notwendigkeit für indirekten Wärmetausch über Wärmeträger, Temperatur, Druckaspekte usw.
- ✓ Investitionskosten und eingesparte Energiekosten

Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks

EINSTEIN's WT Auswahl-Algorithmus:

Basierend auf dem Pinch Algorithmus (Kemp et al., 2007):



Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks

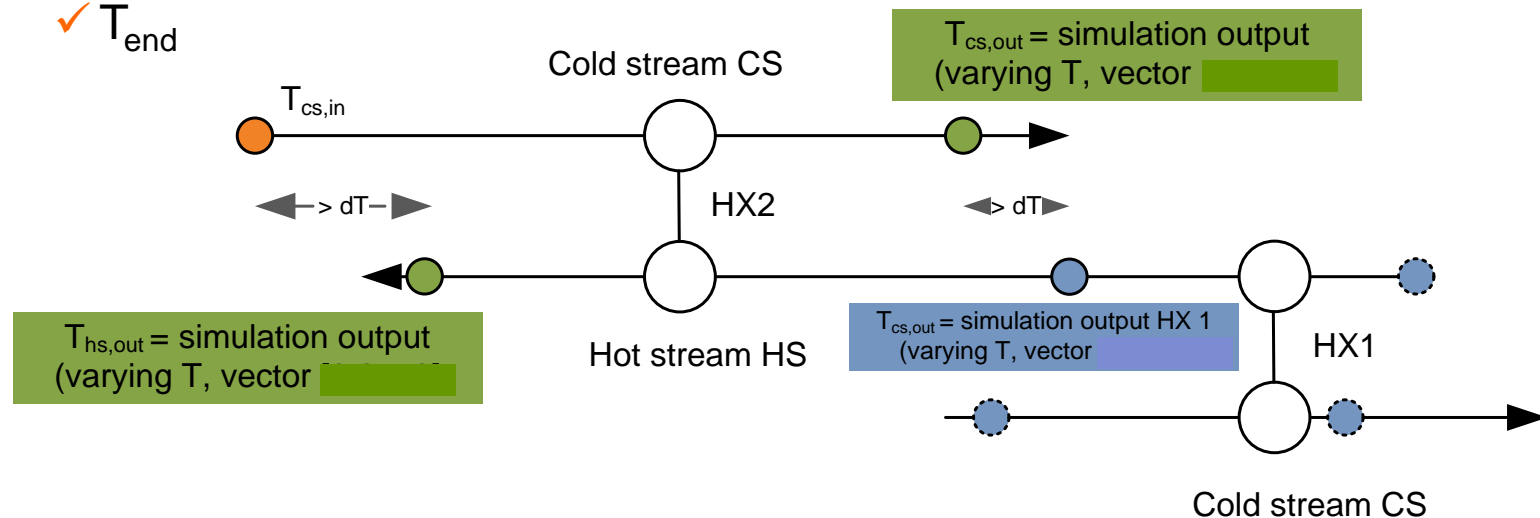
WT Simulation in EINSTEIN:

✓ Startwerte für Quellen und Senken:

- ✓ Q_t
- ✓ T_{start}
- ✓ T_{end}

✓ Simulationsergebnisse

- ✓ Q_{HX_t}
- ✓ T_{inlet_t}
- ✓ T_{outlet_t}



Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks

WT Simulation in EINSTEIN:

Basis-Gleichungen:

$$Q = m_{cs} * cp_{cs} * \Delta T_{cs} = m_{hs} * cp_{hs} * \Delta T_{hs}$$

$$\frac{\Delta T_{cs}}{\Delta T_{hs}} = \frac{m_{hs} * cp_{hs}}{m_{cs} * cp_{cs}}$$

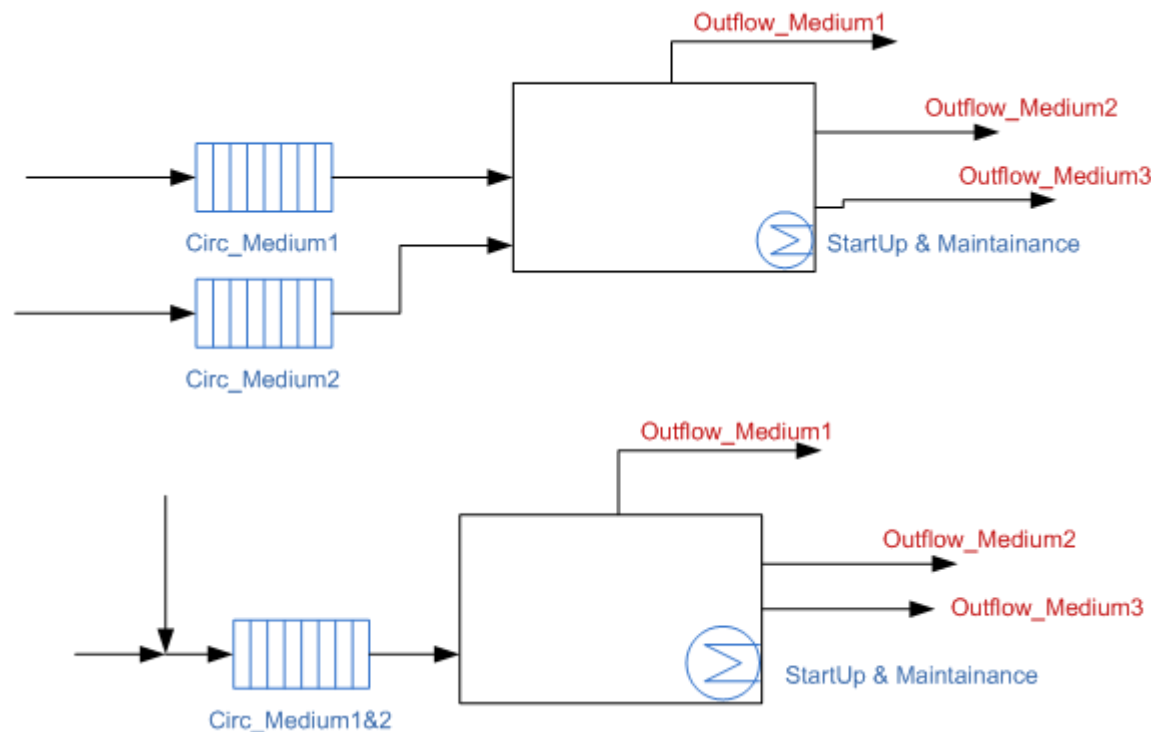
$$Q = U * A * \Delta T_{\log hx}$$

$$\Delta T_{\log hx} = \frac{(T_{hs,in} - T_{cs,out}) - (T_{hs,out} - T_{cs,in})}{\ln\left(\frac{(T_{hs,in} - T_{cs,out})}{(T_{hs,out} - T_{cs,in})}\right)}$$

Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks

WT Simulation in EINSTEIN:

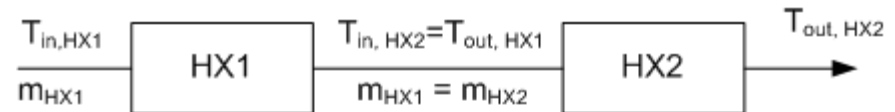
In einem WT können mehrere Quellen und Senken verbunden werden:



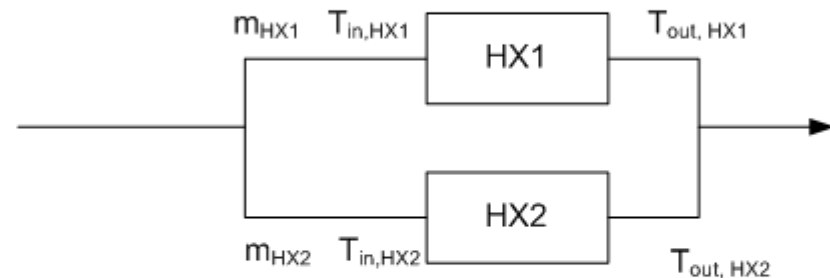
Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks

Mögliche WT-Schaltungen:

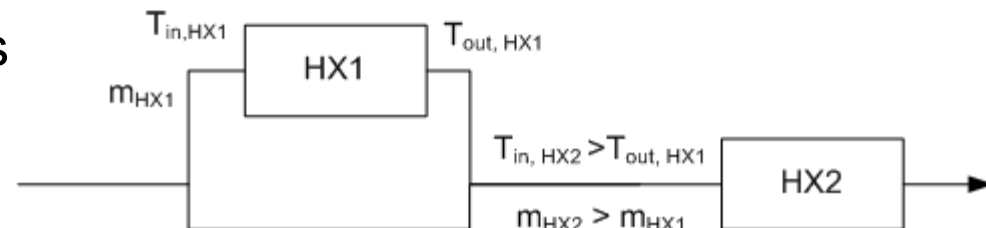
Serienschaltung



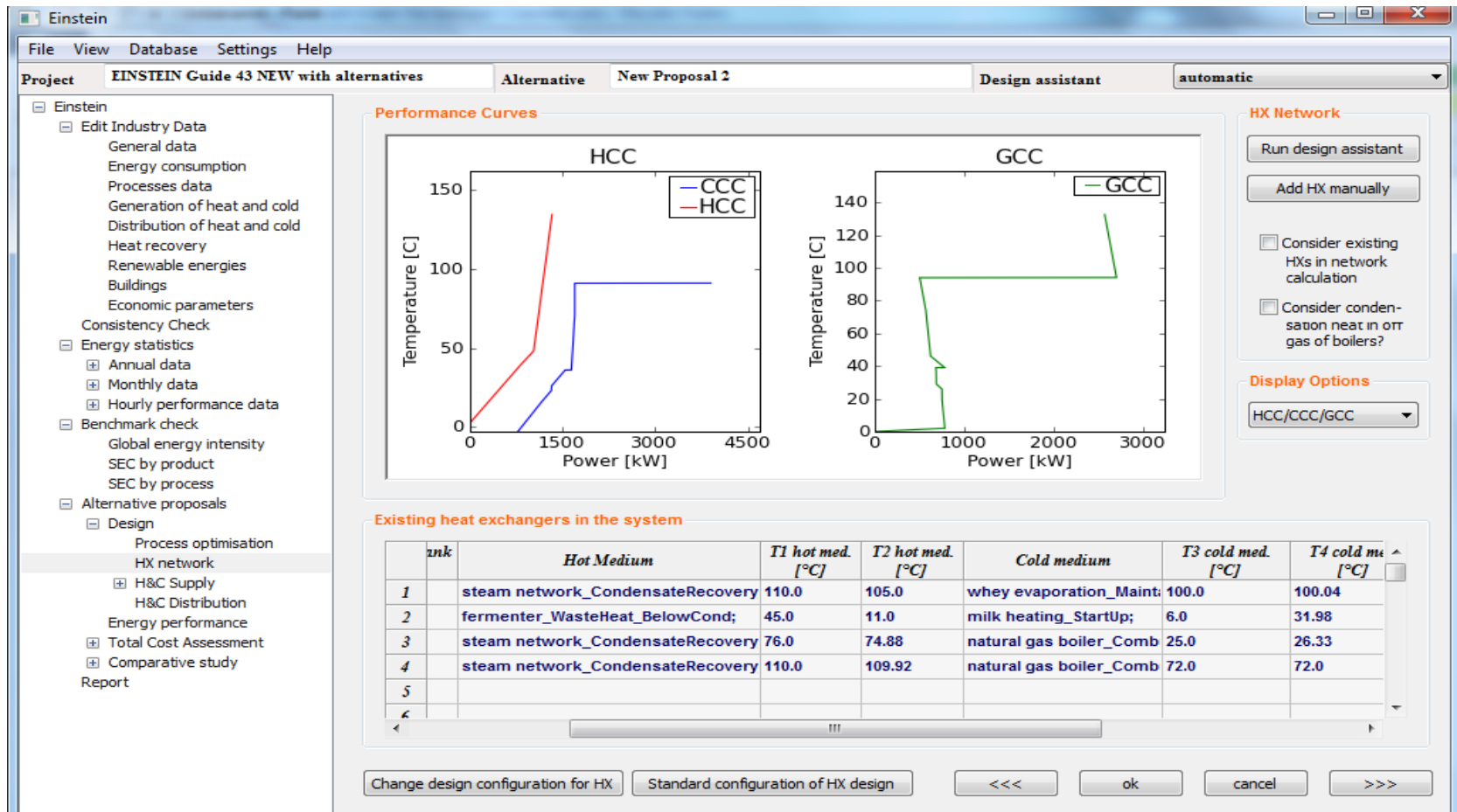
Parallelschaltung



Serienschaltung mit Bypass



Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks



Wärme- und Kälteverbundkurve, Gesamtverbundkurve und vorgeschlagenens WT-Netzwerk

Schritt 7.4: Vor-Entwurf des Wärmetauschernetzwerks

Standardwerte für ΔT_{\min} und den Wärmeübergangskoeffizienten α :

Physikalischer Zustand	ΔT_{\min} [°C]	Wärmeübergangskoeffizient α [W/m²K]
Flüssig	5	5.000
Gasförmig	10	100
Kondensation	2,5	10.000

Wärmetauschertypen und gesamte Wärmeübergangskoeffizienten :

Wärmetausch	In EINSTEIN gewählter Wärmetauscher	Gesamter Wärmeübergangskoeffizient (Material = Edelstahl) α [W/m²K]	Durchschnittswerte in den VDI Wärmeatlanten [W/m²K]
Flüssig – flüssig	Plattenwärmetauscher	2.143	1000 – 4000
Gasförmig – flüssig	Glattrohrwärmetauscher	97	15-70
Kondensation – flüssig	Glattrohrwärmetauscher	2724	500 – 4000
Gasförmig – gasförmig	Glattrohrwärmetauscher	50	5-35
Kondensation – gasförmig	Glattrohrwärmetauscher	99	20 - 60