# PinCH-Tutorial 2

Herzlich Willkommen! Das PinCH-Team der Hochschule Luzern bietet zur Software PinCH Tutorials an, um Ihnen die Möglichkeiten und die Bedienung der Software vorzustellen. In sechs Tutorials werden Grundlagen der Energie- und Kostenoptimierung von industriellen Prozessen mit PinCH vermittelt:

| | |
|---|---|
| PinCH-Tutorial 0 | Einführung und Überblick |
| PinCH-Tutorial 1 | Kontinuierliche Produktionsanlage |
| **PinCH-Tutorial 2** | **Produktionsanlage mit mehreren Betriebsfällen** |
| PinCH-Tutorial 3 | Nicht-kontinuierliche Produktionsanlage |
| PinCH-Tutorial 4 | Integration thermischer Energiespeicher |
| PinCH-Tutorial 5 | Integration von Wärmepumpen |

Die Tutorials sind aufeinander aufbauend gestaltet. Wenn Sie PinCH zum ersten Mal benutzen, empfehlen wir Ihnen, mit Tutorial 0 zu starten.

Auf der Website www.pinch.ch können die Tutorials und die dazugehörenden PinCH-Dateien mit der jeweiligen Musterlösung heruntergeladen werden. Die Tutorials können mit der Testversion von PinCH (Vollversion, befristet auf 15 Tage, limitiert auf 6 Prozessströme) gelöst werden. Um die Testversion zu erhalten, schreiben Sie bitte eine E-Mail an pinch@hslu.ch.

Die Tutorials sind auf Deutsch, Englisch und Französisch erhältlich. Die Beschriftungen in Verfahrensfliessbildern, die Bezeichnungen von Prozessen, Strömen usw. sowie softwarebezogene Begriffe sind immer in Englisch gehalten. Als Währung wird Euro verwendet.

Die Energie- und Kostenoptimierung mit PinCH erfolgt in 10 Schritten (10 Steps). Eine Übersicht zu den 10 Steps sowie ein Symbol- und Abkürzungsverzeichnis finden Sie im Tutorial 0 „Einführung und Überblick".

**In den Tutorials liegt der Fokus auf der Bedienung der Software PinCH.** Es wird davon ausgegangen, dass Sie mit den grundlegenden Prinzipien der Pinch-Analyse vertraut sind. Als Einführung bzw. für einen vertieften Einblick in die Pinch-Methode empfehlen wir folgende Bücher:

- F. Brunner, P. Krummenacher: Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode – Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen. Bundesamt für Energie BFE, 2017 (erhältlich unter www.pinch.ch)
- R. Smith: Chemical Process - Design and Integration. 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2016; Pinch-Analyse ab Kap. 15 (ISBN 978-1-1199-9013-0)
- I. C. Kemp: Pinch Analysis and Process Integration – A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. 2nd Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007 (ISBN 978-0-7506-8260-2)

Sie haben gerade das PinCH-Tutorial 2 vor sich. Darin geht es um die Analyse und Optimierung einer Produktionsanlage mit mehreren Betriebfällen (Multiple Operating Cases, MOCs). Das Tutorial 2 ist wie folgt aufgebaut:

## Inhaltsverzeichnis

**I. Einführung Tutorial 2** **2**

**II. Fallbeispiel: Produktionsanlage mit mehreren Betriebsfällen** **3**

**III. 10 Steps in PinCH** **7**

**IV. Optimierte Produktionsanlage** **21**

## I. Einführung Tutorial 2

**Lernziel:** Sie können eine Energie- und Kostenoptimierung für Produktionsanlagen mit mehreren Betriebsfällen in PinCH durchführen.

**Dauer:** 2-3 Stunden

Bei der Energie- und Kostenoptimierung von Produktionsanlagen mit mehreren Betriebsfällen werden weitere, über Tutorial 1 hinausgehende Aspekte von PinCH vorgestellt. Darunter fallen das Konfigurieren von Equipments sowie das Definieren von MOC-Prozessen. Im vorliegenden PinCH-Tutorial 2 werden Sie in folgenden Schritten durch den Optimierungsprozess geführt (Steps 7 und 9 werden für dieses Fallbeispiel nicht benötigt):

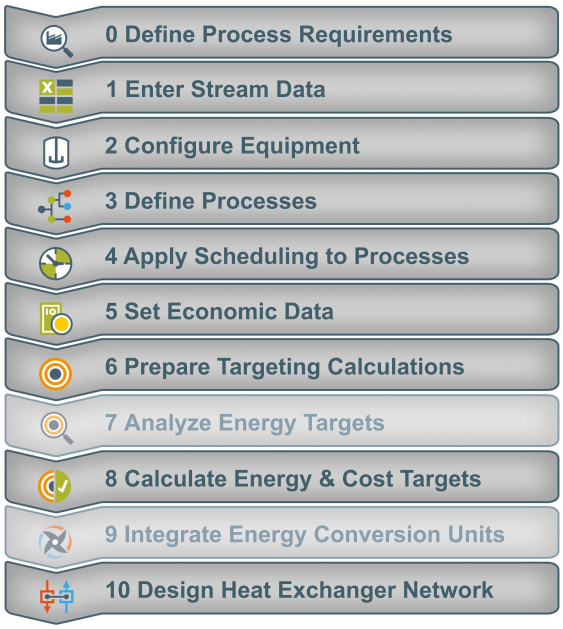



Abbildung 1: Ablauf in PinCH für die Optimierung eines Prozesses mit mehreren Betriebsfällen

Das PinCH-Team der Hochschule Luzern wünscht Ihnen viel Erfolg und eine lehrreiche Zeit!

# II. Fallbeispiel: Produktionsanlage mit mehreren Betriebsfällen

**Prozessbeschreibung**

Wir betrachten eine geplante Produktionsanlage in einem Chemieunternehmen. Mit der Anlage sollen zukünftig zwei unterschiedliche Produkte mit dem gleichen Reaktor hergestellt werden können.

Im ersten Betriebsfall (Operating Case Product C, OC Product C) reagieren die beiden Edukt-ströme (Reactant A und Reactant B) im Reaktor zum Produkt (Product C) (siehe Abbildung 2). Damit die endotherme Reaktion stattfinden kann, müssen beide Eduktströme auf 100 °C erwärmt werden. Das Produkt muss anschliessend auf 40 °C gekühlt werden.

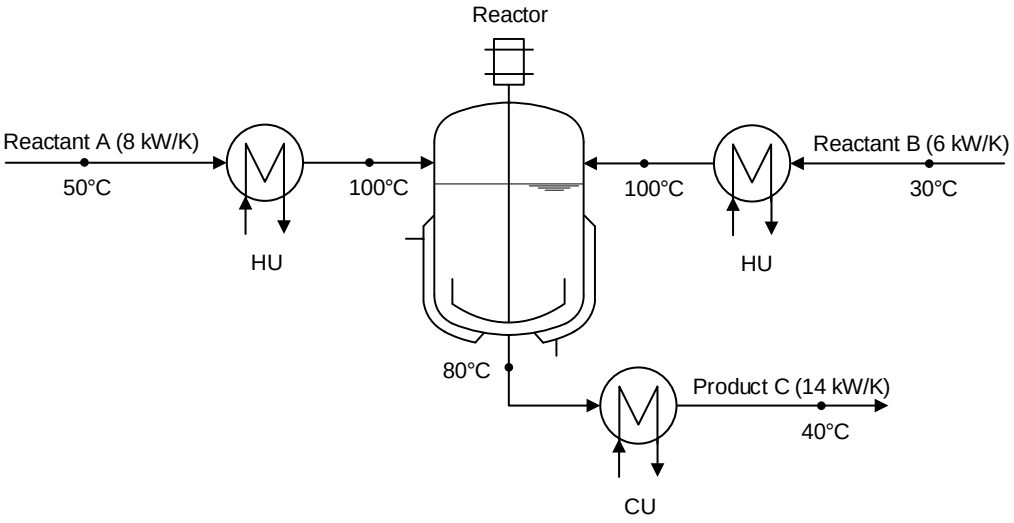



Abbildung 2: Verfahrensfliessbild OC Product C (endotherme Reaktion)

Im zweiten Betriebsfall (Operating Case Product F, OC Product F) reagieren Reactant D und Reactant E zu Product F (siehe Abbildung 3). Bei dieser exothermen Reaktion muss nur Reactant E auf 90 °C erwärmt werden. Reactant D hat bereits eine Temperatur von 90 °C. Das Product F muss wiederum auf 40 °C gekühlt werden. Für alle Prozessströme wird eine Wärmekapazität $c_p$ von 3 kJ/(kg K) und ein Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$ von 1'000 W/(m$^2$ K) verwendet.

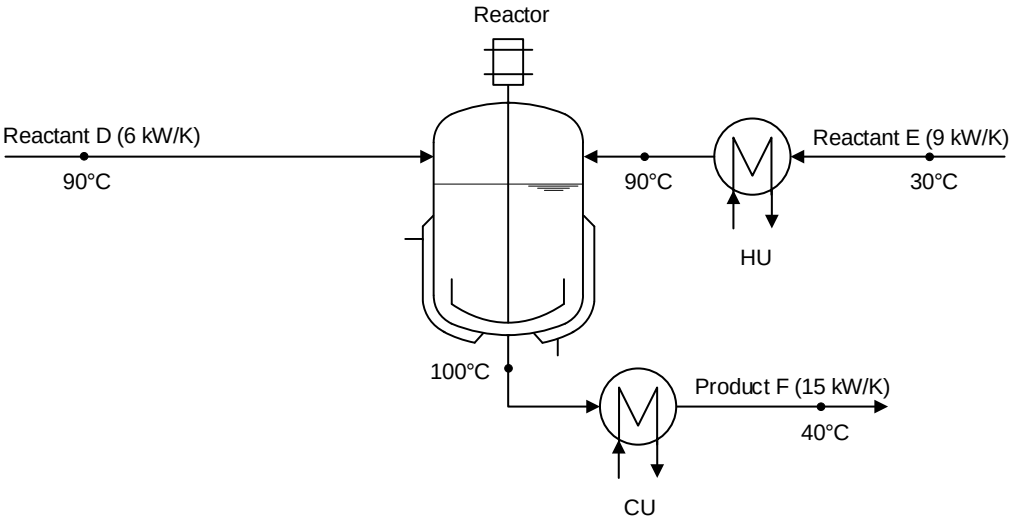



Abbildung 3: Verfahrensfliessbild OC Product F (exotherme Reaktion)

### Zeitplan (Scheduling)

Die beiden Betriebsfälle laufen zeitlich versetzt ab. Allfällige Unterbrüche der Produktion werden vernachlässigt. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, beträgt die Betriebsdauer von OC Product C 3'000 h/a und von OC Product F 4'000 h/a. Gesamthaft ist die Produktion 7'000 h/a in Betrieb.

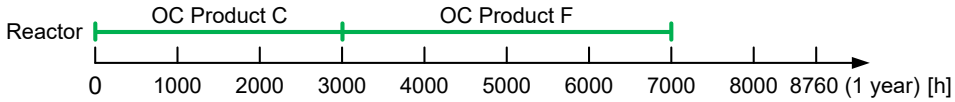



Abbildung 4: Gantt-Diagramm

### Energieversorgung (Utilities)

Für das Heizen und Kühlen der Prozessströme stehen die Utilities aus Tabelle 1 zur Verfügung. Als Hot Utility (HU) wird Heizdampf (Heating Steam) verwendet. Der Heizdampf liegt als Sattdampf vor. Daher wird der Druck $p$ und der Dampfgehalt $x$, anstelle der Eintrittstemperatur ($T_{in}$) und der Austrittstemperatur ($T_{out}$), angegeben. Die Cold Utility (CU) ist Kühlwasser (Cooling Water), welches von einem Kühlturm zur Verfügung gestellt wird.

Tabelle 1: Utility-Daten

| Utility-Strom | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] | $p$ [bar(a)] | $\alpha$ [W/(m$^2$ K)] | $c$ [€/MWh] |
|---|---|---|---|---|---|
| Heizdampf (Heating Steam, HU) | x=1 | x=0 | 4 | 5'000 | 70 |
| Kühlwasser (Cooling Water, CU) | 26 | 32 | 3 | 2'000 | 18 |

Die totalen jährlichen Betriebskosten $C_{Op}$ [€/a] setzen sich aus den jährlichen Betriebskosten pro OC zusammen. Wir betrachten in diesem Tutorial ausschliesslich die Energiekosten, weitere jährliche Kosten, z. B. für Personal und Wartung, werden nicht berücksichtigt. Unter Verwendung der jährlichen Betriebsstunden $\tau$ [h/a], dem Bedarf $\dot{Q}$ an HU/CU [kW] und den spezifischen Kosten $c$ [€/MWh] der HU/CU werden die totalen jährlichen Betriebskosten wie folgt berechnet:

$$C_{Op} = \sum_{OC} C_{Op,OC} = \sum_{OC} \tau_{OC} \cdot \left(\dot{Q}_{HU,OC} \cdot c_{HU,OC} + \dot{Q}_{CU,OC} \cdot c_{CU,OC}\right) \tag{1}$$

Tabelle 2: Utility-Leistungen und Betriebskosten des Prozesses ohne Wärmerückgewinnung (WRG)

| Operating Case (OC) | $\dot{Q}_{HU}$ [kW] | $\dot{Q}_{CU}$ [kW] | $\tau$ [h/a] | $C_{Op}$ [€/a] |
|---|---|---|---|---|
| OC Product C | 820 | 560 | 3'000 | 202'440 |
| OC Product F | 540 | 900 | 4'000 | 216'000 |
| Total | - | - | 7'000 | **418'440** |

### Investitionskosten

Die Berechnung der Investitionskosten kennen Sie bereits aus Tutorial 1. Da nur die Investitionskosten der Wärmeübertrager $C_{HEX}$ (Heat Exchanger, HEX) für die Wärmerückgewinnung (WRG) und die Energieversorgung (Utilities) zu berücksichtigen sind, gilt für die gesamten Investitionskosten $C_{Inv}$:

$$C_{Inv} = C_{HEN} = \sum_{HEX} C_{HEX} = \sum_{HEX} \left(a + C_b \cdot \left(\frac{A}{A_b}\right)^m \cdot f_L\right) \tag{2}$$

wobei $a = 0$ (Grundkosten HEX), $C_b = 20'000$ € (Kosten Referenz-HEX), $A_b = 50$ m$^2$ (Wärmeübertragungsfläche Referenz-HEX), $m = 0.71$ (Degressionsexponent, siehe Tutorial 1) und $f_L = 3$

(Lang-Faktor). Diese Werte werden bei der Kostenberechnung für alle Wärmeübertragern mit der entsprechenden Wärmeübertragungsfläche $A$ verwendet.

Die Wärmeübertrager HU Reactant B und HU Reactant E sowie CU Product C und CU Product F kommen in denselben Equipments (Leitungen) vor. Hier folgt die Auslegung (und damit die Kostenberechnung) des jeweiligen HEX der Prozessanforderung mit der grössten HEX-Fläche. Es werden daher die beiden Wärmeübertrager aus OC Product F berücksichtigt.

Bei Verwendung der Kostenfunktion (Gleichung 2) erhält man folgende Kosten für die zwei HU-HEXs und den CU-HEX:

Tabelle 3: Kosten der einzelnen Wärmeübertrager unter Verwendung von Gleichung 2

| Wärmeübertrager | $\dot{Q}$ [kW] | $\Delta T_m$ [K] | $k$ [W/(m$^2$ K)] | $A$ [m$^2$] | $C_{HEX}$ [€] |
|---|---|---|---|---|---|
| HU Reactant A | 400 | 65.9 | 833.3 | 7.3 | 15'305 |
| HU Reactant E | 540 | 80.3 | 833.3 | 8.1 | 16'478 |
| CU Product F | 900 | 34.2 | 666.7 | 39.5 | 50'754 |
| Total | | | | **54.9** | **83'537** |

**Hinweis:** Zur Berechnung der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz $\Delta T_m$ von HEX 1 und HEX 2 wurde die Kondensationstemperatur von Wasserdampf bei 4 bar(a) (ca. 144 °C) verwendet. Der $k$-Wert wird gemäss Tutorial 1 aus den beiden $\alpha$-Werten der jeweiligen Ströme berechnet: $\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}$. Alle Prozessströme weisen einen $\alpha$-Wert von 1'000 W/(m$^2$ K) auf. Für Heizdampf beträgt $\alpha$ 5'000 W/(m$^2$ K) und für Kühlwasser 2'000 W/(m$^2$ K).

Die HEX-Fläche $A$ wird in PinCH mithilfe der logarithmischen Temperaturdifferenz $\Delta T_m$ und dem Wärmedurchgangskoeffizienten $k$ nach folgender Gleichung bestimmt: $A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T_m}$.

### Gesamtkosten

Die jährlichen Gesamtkosten $C_{tot}$ [€/a] werden aus den jährlichen Investitionskosten $A \cdot C_{Inv}$ [€/a] und den jährlichen Betriebskosten $C_{Op}$ [€/a] gebildet, siehe Gleichung 3. Dabei ist $A$ der Annuitätsfaktor.

$$C_{tot} = A \cdot C_{Inv} + C_{Op} \quad \text{mit} \quad A = \frac{Z \cdot (1+Z)^n}{(1+Z)^n - 1} \tag{3}$$

Folgende Daten sind gegeben:

- Abschreibungszeitraum (Depreciation Period): $n = 4$ a
- Zinsfaktor (Interest Rate): $Z = 5$ %

Der Annuitätsfaktor beträgt $A = 0.282$. In diesem Tutorial wird die Planung einer neuen Anlage betrachtet, deren Investitionskosten in Tabelle 3 zu finden sind. Die Investitionskosten des Reaktors werden vernachlässigt, da sie unabhängig von der Energie- und Kostenoptimierung sowieso getätigt werden müssen. Es ergeben sich jährliche Gesamtkosten von ungefähr $C_{tot} = A \cdot C_{Inv} + C_{Op} = 442'000$ €/a.

### Problemstellung

- Bestimmen Sie für die beiden OCs die Energie- und Kostenziele.
- Erstellen Sie für beide OCs jeweils ein Wärmeübertragernetzwerk MER HEN (Maximum Energy Recovery Heat Exchanger Network).
- Kombinieren Sie die zwei MER HENs zu einem einzigen Verfahrensfliessbild, welches für beide OCs verwendet werden kann.

### Step 0: Define Process Requirements

Definieren Sie die Prozessanforderungen, indem Sie die relevanten Daten extrahieren (Datenextraktion siehe Tutorial 1). Reactant D stellt keine Prozessanforderung dar, da der Prozessstrom bereits auf der gewünschten Temperatur von 90 °C ist.

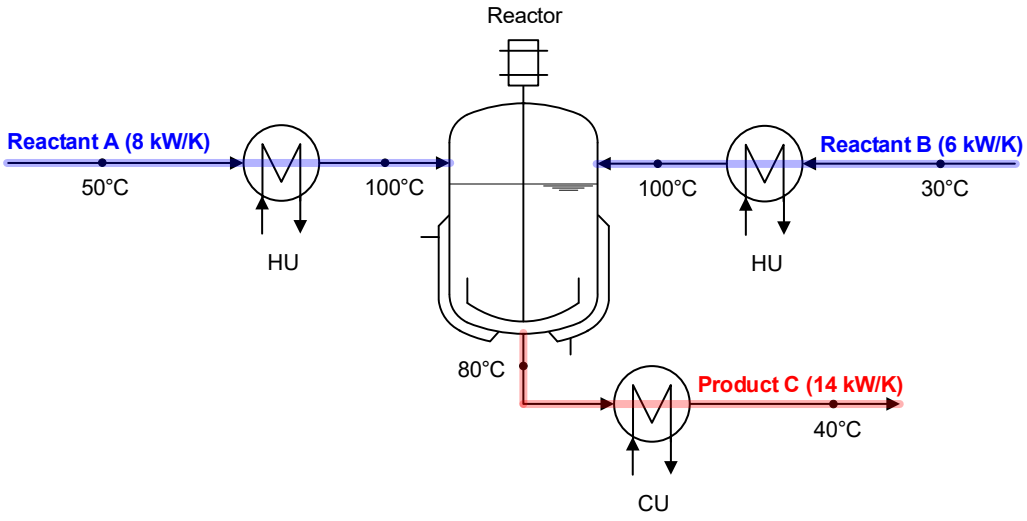



Abbildung 5: Prozessanforderungen OC Product C (endotherme Reaktion)

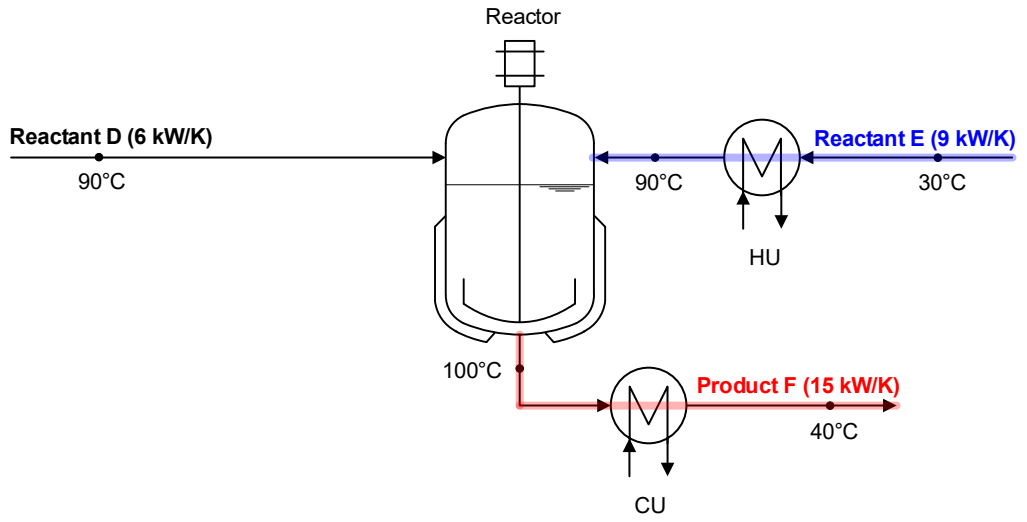



Abbildung 6: Prozessanforderungen OC Product F (exotherme Reaktion)

Tabelle 4: Prozessanforderungen

| Operating Case (OC) | Prozessstrom | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] | $c_p$ [kJ/(kg K)] | $\alpha$ [W/(m$^2$ K)] | $CP$ [kW/K] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| OC Product C | Reactant A | 50 | 100 | 3 | 1'000 | 8 |
| OC Product C | Reactant B | 30 | 100 | 3 | 1'000 | 6 |
| OC Product C | Product C | 80 | 40 | 3 | 1'000 | 14 |
| OC Product F | Reactant E | 30 | 90 | 3 | 1'000 | 9 |
| OC Product F | Product F | 100 | 40 | 3 | 1'000 | 15 |

## III. 10 Steps in PinCH

**Los geht's!**

Zum Starten der Pinch-Analyse öffnen Sie PinCH. Bevor wir mit dem eigentlichen Projekt starten, empfiehlt es sich, die Grundeinstellungen in PinCH anzupassen. Da die Kosten in diesem Tutorial in € angegeben werden, sollte die Währung in den Einstellungen angepasst werden. Bitte verwenden Sie einen Wechselkurs von 0.95 CHF/€. Des Weiteren wird in diesem Tutorial mit den Einheiten in kW und MWh gearbeitet. Wie Sie bei der Anpassung vorgehen, wird im Tutorial 0 erläutert.

Das Tutorial folgt den 10 Steps in PinCH. Erstellen Sie zuerst ein neues Projekt und geben Sie diesem einen passenden Namen.

### Step 1: Enter Stream Data

Die Prozessanforderungen werden in die Process Stream Table eingetragen. Die fertige Process Stream Table sieht folgendermassen aus:

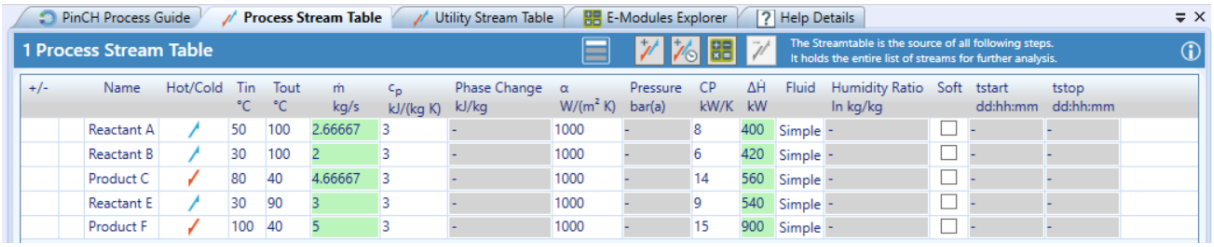



Abbildung 7: Process Stream Table

Die Utilities (HU und CU) werden in die Utility Stream Table eingetragen. Die befüllte Utility Stream Table sieht wie folgt aus:

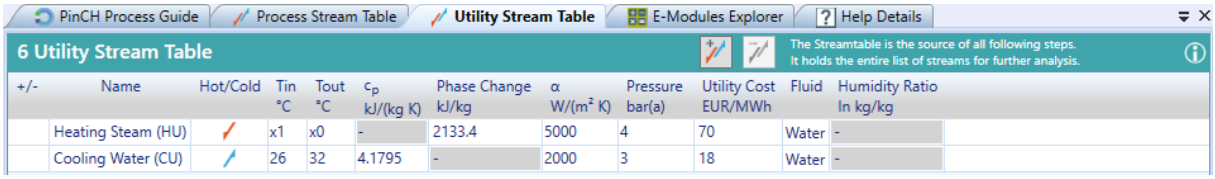



Abbildung 8: Utility Stream Table

### Step 2: Configure Equipment

In unserem Fallbeispiel werden dieselben Equipments für beide OCs verwendet. Im Project Explorer unter ☞ Equipment ☞ Individual ist ersichtlich, dass zu Beginn jeder Prozessstrom einem eigenen Equipment zugewiesen ist. Um dies zu ändern, gehen Sie wie folgt vor:

- ☞ Rechtsklick auf Eqiupment ☞ Add Equipment (zweimal)
- ☞ Benennen Sie die neu erstellten Equipments in „Reactants B, E" und „Products C, F" um (Taste F2).
- ☞ Wählen Sie nun in der Process Stream Table den Strom Reactant B an.
- ☞ Klicken Sie unterhalb des Target Explorers auf Properties.
- ☞ Öffnen Sie das Dropdown-Menü bei Equipment und wählen Sie „Reactants B, E" aus.
- ☞ Weisen Sie analog den Strom Reactant E dem Equipment Reactants B, E zu.
- ☞ Weisen Sie nun die Ströme Product C und Product F dem Equipment Products C, F zu.
- ☞ Benennen Sie das Equipment „New Process Stream 1 Eq", dem Reactant A zugeordnet ist, unter Individual in „Reactant A" um. Da dieses nur in OC Product C vorkommt, handelt es sich um ein Individual Equipment.

Mehrere Equipments sind nun keinen Prozessströmen mehr zugeordnet und können daher gelöscht werden (Rechtsklick auf das jeweilige Equipment ☞ Remove Equipment).

Im Project Explorer finden Sie nun unter Shared z. B. das Equipment Products C, F. Wenn Sie dieses anklicken, werden die zugewiesenen Ströme in der Process Stream Table blau hinterlegt. Auf diese Weise können Sie noch einmal Ihre Zuordnung überprüfen.

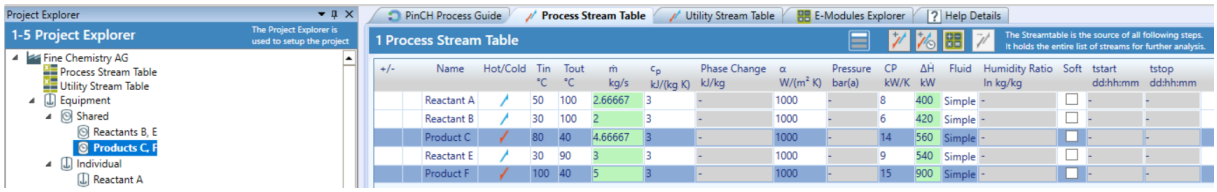



Abbildung 9: Das Equipment Products C, F enthält die blau hinterlegten Prozessströme Product C und Product F

### Step 3: Define Processes

Um eine Produktionsanlage mit mehreren Betriebsfällen zu definieren, müssen die Prozessströme den beiden OCs zugewiesen werden:

- ☞ Rechtsklick auf Processes ☞ Add Continuous Process
- ☞ Benennen Sie die beiden Prozesse „Process 1" und „Process 2" in „OC Product C" und „OC Product F" um (Taste F2 verwenden).
- ☞ Fügen Sie die Prozessströme (Reactants und Product) dem zugehörigen OC hinzu (OC Product C oder OC Product F).

**Hinweis:** Es ist nicht möglich, dass zwei Prozessströme gleichzeitig durch dasselbe Equipment fliessen. Daher können Prozessströme, welche dem gleichen Equipment zugewiesen sind, nicht demselben OC zugewiesen werden. Entsprechende Prozessströme sind in der Process Stream Table grau hinterlegt.

Erstellen Sie nun eine Multiple Operating Cases Group (MOC Group) und fügen Sie OC Product C und OC Product F dieser hinzu:

- ☞ Rechtsklick auf Processes ☞ Add Multiple Operating Cases Group
- ☞ Benennen Sie den Prozess „MOC Group 3" in „Chemical Process" um.
- ☞ Rechtsklick auf Chemical Process
- ☞ Assign Process... und wählen Sie nacheinander OC Product C und OC Product F aus.

### Step 4: Apply Scheduling to Processes

Der Zeitplan (Schedule) unserer Produktionsanlage wurde im Kapitel II vorgegeben. OC Product C läuft während 3'000 h/a und OC Product F während 4'000 h/a.

**Hinweis:** PinCH berücksichtigt natürlich, dass die Prozessströme der beiden OCs nicht gleichzeitig existieren können. Wenn Sie Änderungen an der Dauer von OCs vornehmen, müssen Sie darauf achten, dass sich die OCs nie überschneiden. Ansonsten wird die Änderung nicht übernommen.

Öffnen Sie die Registerkarte OC Schedule 1 und tragen Sie die Betriebsstunden für den in Step 3 definierten Chemical Process ein.

- ☞ Klicken Sie auf das + vor Chemical Process (unter OC Schedule 1 in Continuous Processes).
- ☞ Ändern Sie in der Spalte CW Start die Startwoche von OC Product C auf 1. Ändern Sie für den OC Product F die Startwoche auf 43. Damit wird eine Überschneidung der beiden OCs vermieden.
- ☞ Wählen Sie in Spalte Timebase für beide OCs „Cont. Year" an.
- ☞ Passen Sie in der Spalte Duration die Dauer der beiden OCs an.
- ☞ Um keine Unterbrechung zwischen den beiden OCs zu erhalten, können Sie den Starttag (Spalten Mo bis Su), die Startzeit (Spalte Daytime Start) und die Startwoche (Spalte CW Start) des OC Product F möglichst nahe an das Ende des OC Product C setzen (Start z. B. am Montag um 07:00 Uhr in Woche 19). Dies ist aber nicht zwingend nötig.

**Zusatzinformation:** Die Spalte Production Campaign Start gibt an, zu welchem Zeitpunkt der OC relativ zum Jahresbeginn startet. Die Spalte Production Campaign End gibt entsprechend an, zu welchem Zeitpunkt der Prozess relativ zum Jahresbeginn endet. Die Gross Operation Time gibt die Betriebsdauer des OC inklusive Unterbrechungen an (Differenz zwischen Production Campaign Start und Production Campaign End). Die Net Operation Time gibt an, wie viele Stunden der OC effektiv in Betrieb ist (berücksichtigt Unterbrechungen über Nacht, an

Wochenenden usw.). Die Net Operation Time entspricht den Gesamtbetriebsstunden pro Jahr und wird für die Berechnung der Energiekosten verwendet.

Für unser Fallbeispiel sieht die Registerkarte OC Schedule 1 wie folgt aus:

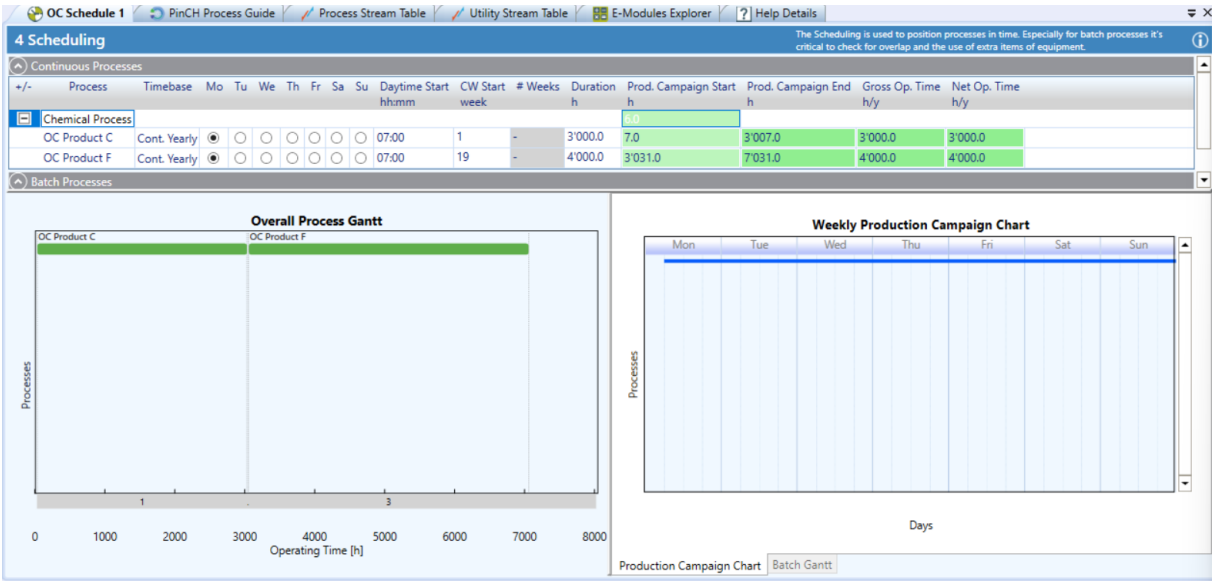



Abbildung 10: Operating Cases Scheduling

Im Diagramm Overall Process Gantt sind die beiden OCs mit ihrer Dauer dargestellt. Es ist erkennbar, dass OC Product F kurz nach OC Product C startet. Im Weekly Production Campaign Chart ist die Produktionszeit des chemischen Prozesses in einer Woche dargestellt. In unserem Fallbeispiel handelt es sich um eine Produktion ab Montagmorgen 7 Uhr.

### Step 5: Set Economic Data

Die wirtschaftlichen Kenngrössen haben Sie bereits im Tutorial 1 kennengelernt. Die Kosten für die Wärmeübertrager werden in PinCH, wie im Abschnitt „Investitionskosten" auf Seite 4 beschrieben, berechnet. Neben den Angaben zum Referenz-HEX (Heat Exchanger Costs in Abbildung 11) werden im Step 5 die Investitionskenngrössen (Amortisation Parameters) definiert.

Ändern Sie die Heat Exchanger Costs und die Amortisation Parameters gemäss den Angaben auf Seite 4 bzw. in Abbildung 11.

**Zusatzinformation:** Kosten für Elektrizität, unabhängige Fixkosten sowie Personal- und Wartungskosten können nach Bedarf eingetragen werden. Vor allem die Elektrizitätskosten sind bei der Integration einer Wärmepumpe von grosser Bedeutung. Zur Bestimmung des optimalen $\Delta T_{min}$ sind diese jedoch nicht relevant, da sie einen vom $\Delta T_{min}$ unabhängigen (konstanten) Betrag darstellen.

Ihr fertiger Datensatz sollte folgende Werte enthalten:

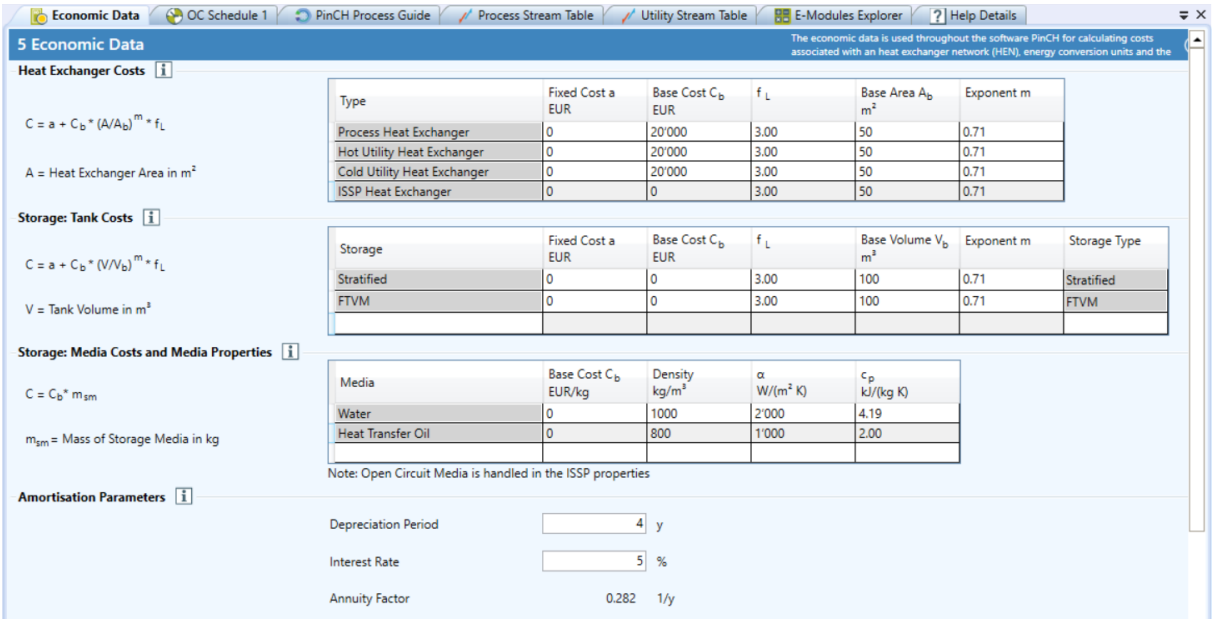



Abbildung 11: Economic Data

Mit dem Erfassen der ökonomischen Daten in Step 5 ist die Produktionsanlage vollständig in PinCH charakterisiert. In den Steps 6-10 folgt nun die Energie- und Kostenoptimierung auf Basis der im Project Explorer eingegebenen Daten. Ihr Project Explorer sollte nun folgenden Aufbau haben:

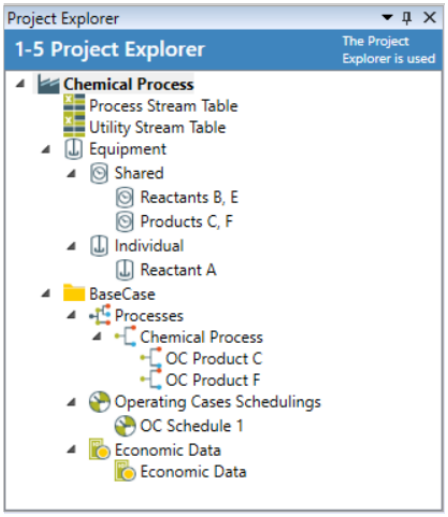



Abbildung 12: Project Explorer

### Step 6: Prepare Targeting Calculations

Zur Untersuchung eines Szenarios erstellen Sie eine neue Target Group (Rechtsklick auf Base Case ☞ Add Target Group) und weisen ihr den in Step 3 definierten Chemical Process zu (Rechtsklick auf Processes ☞ Assign Process). Fügen Sie der Target Group, falls nicht bereits automatisch geschehen, die in Step 1 definierten Hot und Cold Utilities hinzu. Weitere Informationen zum Zuweisen von Prozessen, Utilities usw. finden Sie im Tutorial 1.

Ihr Target Explorer sieht nun folgendermassen aus:

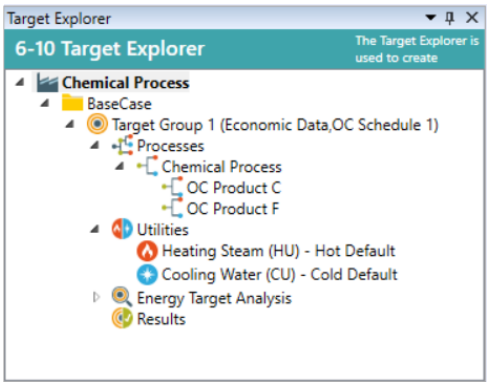



Abbildung 13: Target Explorer

### Step 7: Analyze Energy Targets

Das Energy Target Analysis (ETA) Tool ermöglicht dem Benutzer, eine beliebige Kombination von Prozessen, im Speziellen sich überlappende Prozesse im MOC-Fall, aus energetischer Perspektive zu analysieren. Mit Hilfe der Prozessintegration kann im Step 7 herausgefunden werden, welche Kombination von Prozessen den grössten energetischen Nutzen bringt.

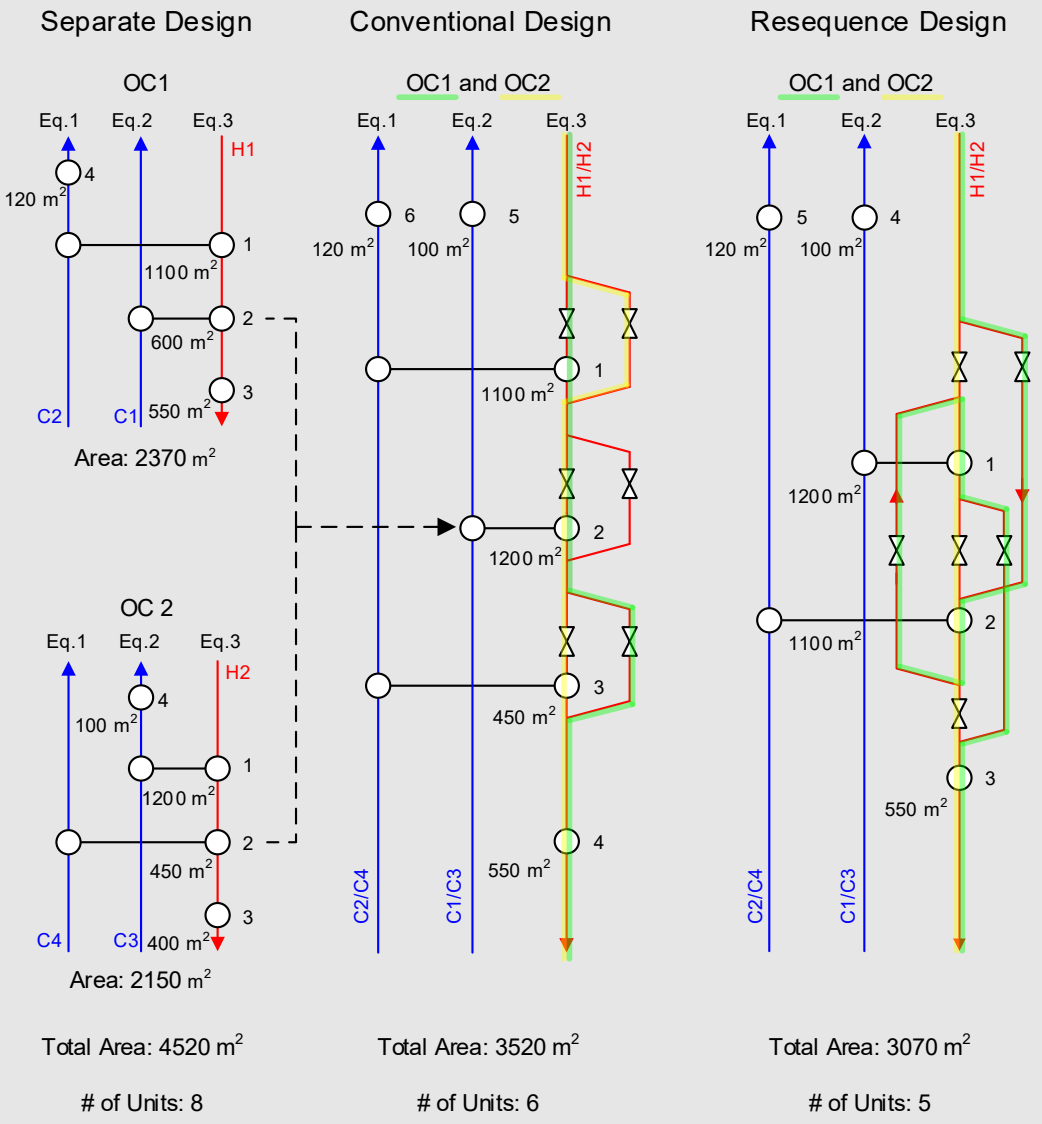
**Zusatzinformation:** Neben der Untersuchung des Einflusses einzelner Prozesse auf das gesamte WRG-Potenzial erlaubt das Energy Target Analysis (ETA) Tool, für Batch-Prozesse das zeitgleiche (direkte) und das zeitverschobene (indirekte) WRG-Potenzial zu analysieren. Es ist besonders hilfreich für komplexere Systeme, bei denen mehrere Operating Cases zu optimieren sind.

Für unser Fallbeispiel mit zwei OCs ist eine detaillierte Analyse im Step 7 nicht nötig.

### Step 8: Calculate Energy & Cost Targets

Im Targeting können die Designtypen Separate Design, Conventional Design und Resequence Design miteinander verglichen werden. Mit dem Separate Design wird für jeden OC ein separates Heat Exchanger Network (HEN) erstellt. Conventional Design und Resequence Design basieren auf der Verwendung von HEXs in mehreren OCs. Dadurch kann die Anzahl der HEXs im Gesamtsystem reduziert werden (siehe BFE-Handbuch). In unserem Fallbeispiel führen wir das Supertargeting mit dem Conventional Design aus.

**Zusatzinformation:** Verglichen mit der „klassischen" Pinch-Analyse eines einzelnen kontinuierlichen Prozesses geht es beim MOC Super Targeting/HEN Design zusätzlich um die Maximierung der wiederverwendeten HEX-Fläche zwischen verschiedenen OCs. Dies stellt ein komplexes Optimierungsproblem dar. Unter der Wiederverwendungsfreiheit eines HEX wird die Möglichkeit verstanden, denselben HEX von einem OC in einem anderen OC zwischen beliebigen Prozessströmen wiederzuverwenden. Die beiden Designtypen Conventional Design und Resequence Design schränken die Wiederverwendungsfreiheit von HEXs ein und vereinfachen dadurch das Optimierungsproblem. Nachfolgend werden die drei Designtypen anhand eines Dreistrom-Falls (losgelöst von unserem Fallbeispiel) kurz erklärt.




Das **Separate Design** betrachtet, wie der Name bereits vermuten lässt, jeden OC separat. Zwischen den OCs wird keine HEX-Fläche wiederverwendet (damit hat kein HEX eine Wiederverwendungsfreiheit). Dadurch fällt die Anzahl an HEXs im Separate Design höher aus als in den weiteren Designtypen. Im Beispiel oben werden 8 HEXs mit einer Gesamtfläche von 4'520 m² benötigt.

Das **Conventional Design** ermöglicht die Wiederverwendung der HEX-Flächen zwischen den OCs. Die Wiederverwendungsfreiheit der HEXs wird allerdings durch zwei Einschränkungen limitiert:

(1) Die HEXs im Gesamtdesign können höchstens zwischen den gleichen Equipments (Leitungen) eingesetzt werden: Im Separate Design benutzen der HEX2 im OC1 (600 m²) und der HEX1 im OC2 (1'200 m²) dieselben Equipments (Eq.1 und Eq.3). Im Conventional Design

können diese beiden HEXs auf einen HEX reduziert werden, indem einfach derjenige mit der grösseren Fläche verwendet wird (HEX1 aus OC2 mit einer HEX-Fläche von 1'200 $m^2$).

(2) Zusätzlich besteht im Conventional Design die Einschränkung, dass jeder Prozessstrom die HEXs in der gleichen Reihenfolge durchströmen muss, wie im jeweiligen OC selbst. Daraus folgt die Bedingung, dass pro Equipment immer nur ein HEX für alle OCs gemeinsam genutzt werden kann. Die totale HEX-Fläche hat sich im Vergleich zum Separate Design um 1'000 $m^2$ reduziert und es werden zwei HEXs weniger benötigt.

Beim **Resequence Design** werden wie beim Conventional Design die HEXs zwischen den gleichen zwei Leitungen eingesetzt. Im Gegensatz zum Conventional Design erlaubt das Resequence Design, die HEXs in einer beliebigen Reihenfolge zu durchströmen. Dadurch können die HEXs flexibler eingesetzt werden und die totale HEX-Fläche des Gesamtdesigns kann gegenüber dem Conventional Design um weitere 450 $m^2$ reduziert werden. Desweiteren werden nur noch 5 HEXs benötigt.

Weiterführende Informationen zu diesem Thema finden Sie im BFE-Handbuch.

Starten Sie das Supertargeting:

☞ Rechtsklick auf Results

☞ Calculate Target Result with... ☞ MOC Supertargeting (Global $\Delta T_{min}$) wählen

Um eine bessere Übersicht zu erhalten, blenden Sie die Time Charts durch Abwählen der Kontrollkästchen Processes und OCs aus und maximieren Sie das Fenster OC Charts, indem Sie die obere Kante des Fensters bis ganz nach oben ziehen.

Im Fenster OC Charts wollen wir die Diagramme CCs (Composite Curves) und Costs (Cost Curves) analysieren (siehe Abbildung 14). Um zwischen den beiden OCs zu wechseln, können Sie auf der rechten Seite bei OCs auf das Auge vor dem gewünschten OC klicken. Sie können auch beide gleichzeitig anzeigen lassen (siehe Abbildung 14).

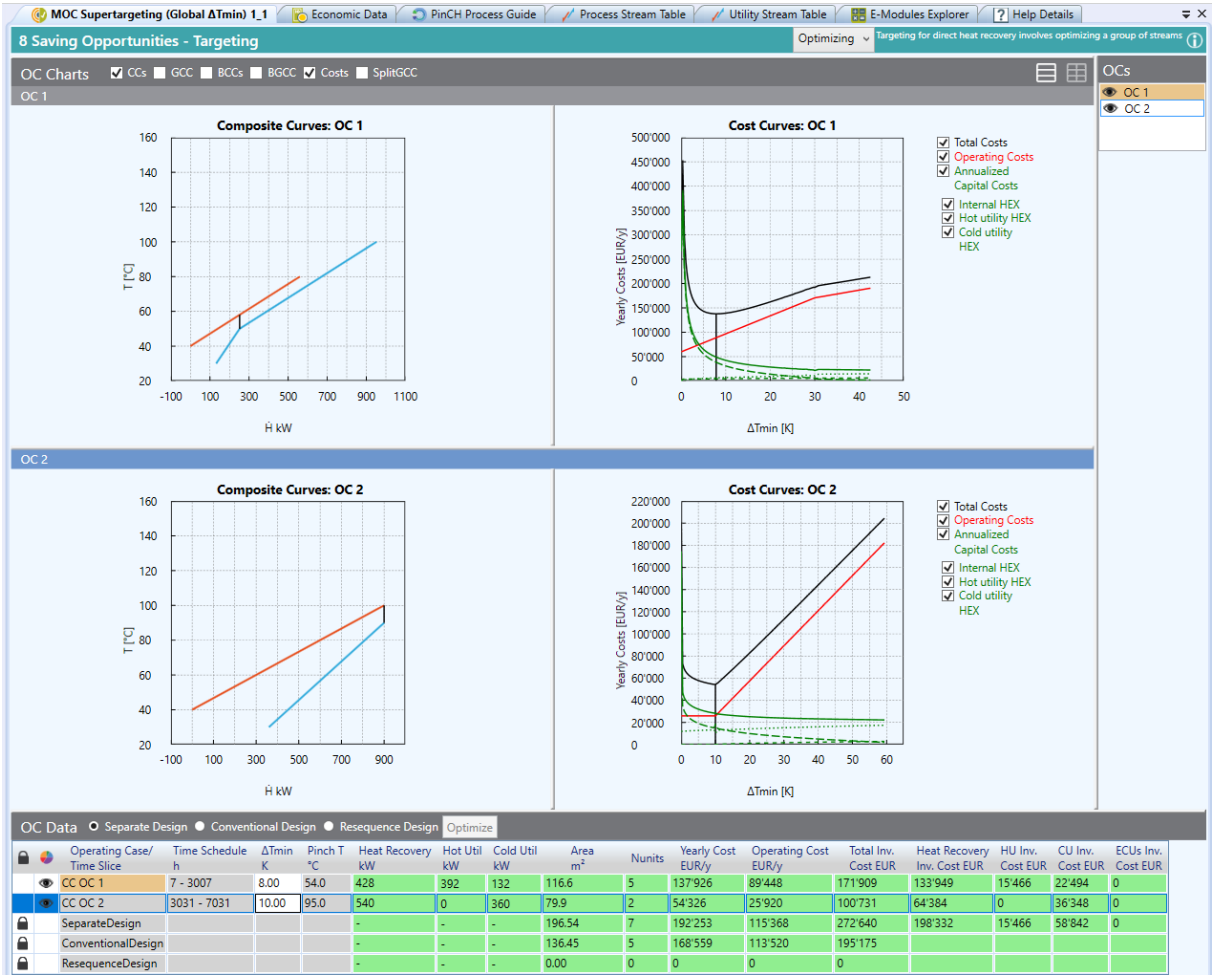



Abbildung 14: Composite Curves, Cost Curve und OC Data der beiden Operating Cases

In Abbildung 14 entspricht die Bezeichnung OC 1 unserem OC Product C und OC 2 somit OC Product F.

Für die Energie- und Kostenoptimierung gehen Sie wie folgt vor:

☞ Wählen Sie im Fenster OC Data das Conventional Design an.

☞ Klicken Sie anschliessend auf Optimize.

Die optimale minimale Temperaturdifferenz $\Delta T_{min}$ von OC1 hat sich durch die Optimierung für ein Conventional Design von 7.86 K auf 7.54 K verändert (Spalte $\Delta T_{min}$). Für die weiteren Schritte setzen wir das $\Delta T_{min}$ von OC1 im Conventional Design auf 7.50 K und im Separate Design auf 8.00 K.

In Abbildung 14 ist zudem ersichtlich, dass OC2 ein „Threshold Problem" darstellt: Wird die Cold CC nach links verschoben, verringert sich das $\Delta T_{min}$ und damit der Bedarf an CU unterhalb des Pinch-Punktes. Mit dem Verschieben entsteht aber auch gleichzeitig Bedarf an CU oberhalb des Pinch-Punktes. Insgesamt bleibt der Gesamtbedarf an CU konstant. Eine Rechtsverschiebung der Cold CC hätte eine Vergrösserung des CU-Bedarfs zur Folge. Zusätzlich würde ein HU-Bedarf oberhalb des Pinch-Punktes entstehen. Daher muss das $\Delta T_{min}$ für das Separate Design und das Conventional Design auf 10.00 K gesetzt werden.

Tabelle 5 vergleicht das ursprünglich geplante Design der Produktionsanlage ohne WRG, das Separate Design und das Conventional Design miteinander.

Tabelle 5: Vergleich des Designs ohne WRG mit dem Separate und dem Conventional Design

| | HU | | CU | | HEX-Fläche | J. Invest.-kosten | J. Energie-kosten | J. Gesamt-kosten |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [kW] | [MWh/a] | [kW] | [MWh/a] | $A$ [m$^2$] | $A \cdot C_{Inv}$ [€/a] | $C_{En}$ [€/a] | $C_{tot}$ [€/a] |
| Design ohne WRG | | | | | | | | |
| OC 1 | 820 | 2'460 | 560 | 1'680 | - | - | 202'440 | - |
| OC 2 | 540 | 2'160 | 900 | 3'600 | - | - | 216'000 | - |
| Total | - | 4'620 | - | 5'280 | 54.9 | 23'557 | 418'440 | **441'997** |
| Separate Design (Target) | | | | | | | | |
| OC 1 | 392 | 1'176 | 132 | 396 | 116.6 | 48'478 | 89'448 | 137'926 |
| OC 2 | 0 | 0 | 360 | 1'440 | 79.9 | 28'406 | 25'920 | 54'326 |
| Total | - | 1'176 | - | 1'836 | 196.5 | 76'884 | 115'368 | **192'252** |
| Conventional Design (Target) | | | | | | | | |
| OC 1 | 385 | 1'155 | 125 | 375 | - | - | - | - |
| OC 2 | 0 | 0 | 360 | 1'440 | - | - | - | - |
| Total | - | 1'155 | - | 1'815 | 136.5 | 55'039 | 113'520 | **168'559** |

Das Design ohne WRG weist zwar mit Abstand die geringste HEX-Fläche von 54.9 m$^2$ und dadurch die geringsten Investitionskosten von 23'557 €/a auf, die jährlichen Energiekosten sind aber mit 418'440 €/a am höchsten, da das Heizen und Kühlen vollständig von den Utilities übernommen werden muss. Aus diesem Grund fallen auch die jährlichen Gesamtkosten mit 441'997 €/a am höchsten aus.

Das Separate Design berücksichtigt die WRG für jeden OC separat. Im Vergleich zum Design ohne WRG steigen dadurch die HEX-Fläche sowie die Investitionskosten. Durch die WRG können aber im Vergleich zum Design ohne WRG rund 72 % an Energiekosten eingespart werden. Die jährlichen Gesamtkosten werden um 57 % reduziert.

Das Conventional Design berücksichtigt die Möglichkeit, HEX-Fläche zwischen den OCs wiederzuverwenden. Aus diesem Grund lässt sich die totale HEX-Fläche verglichen mit dem Separate Design reduzieren, was die geringeren Investitionskosten begründet. Zusätzlich fallen die jährlichen Energiekosten geringfügig kleiner aus als beim Separate Design. Insgesamt scheint das Conventional Design mit jährlichen Gesamtkosten von 168'559 €/a aus wirtschaftlicher Sicht der vorteilhafteste Designtyp zu sein. Mit dem Conventional Design lassen sich im Vergleich zum Design ohne WRG bereits während des Abschreibungszeitraums von 4 Jahren dank der Energie- und Kostenoptimierung mit PinCH 1.1 Mio. € einsparen.

Schauen wir uns abschliessend die GCC (Grand Composite Curve) in Abbildung 15 an:

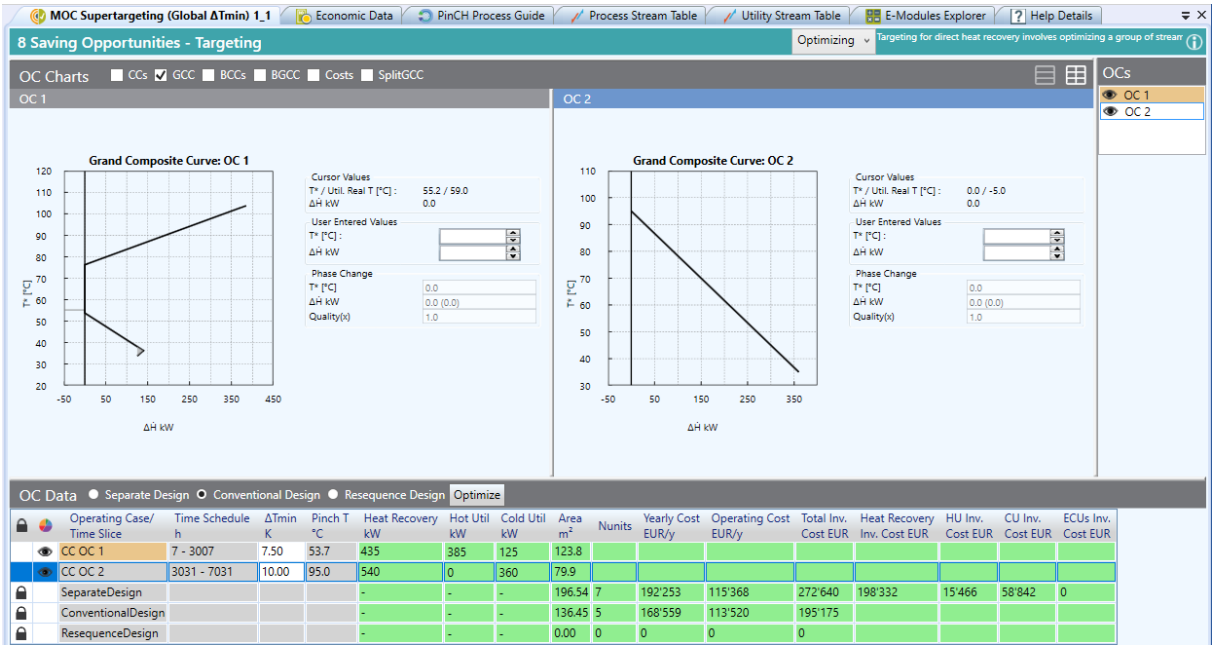



Abbildung 15: Grand Composite Curves der beiden Operating Cases

Die Interpretation der GCC wird in Tutorial 1 erklärt, hier soll nur kurz auf potenzielle Optimierungen eingegangen werden: In OC1 ist oberhalb des Pinch-Punktes ein grosser Wärmebedarf vorhanden. Hier kann es interessant sein, die Systemgrenze zu erweitern und den Produktionsbetrieb auf weitere, noch nicht erfasste Wärmequellen zu untersuchen (Stichwort Total Site Analysis, TSA).

### Step 9: Integrate Energy Conversion Units (ECUs)

Im OC1 liegt zwischen 80 °C bis 107 °C ein Wärmebedarf von 378 kW vor (siehe Abbildung 15), so dass die Möglichkeit der Integration einer ECU (z. B. Blockheizkraftwerk, BHKW) geprüft werden müsste. Bei einer Integration einer ECU in eine Produktionsanlage mit MOC besteht die zusätzliche Schwierigkeit, dass die ECU für beide OCs ausgelegt werden muss. Um den Nutzen einer ECU zu evaluieren, sind weitergehende Untersuchungen notwendig, welche den Umfang dieses Tutorials sprengen würden.

### Step 10: Design Heat Exchanger Network (HEN)

Gratulation! Sie haben das Targeting als Grundlage einer energetischen und wirtschaftlichen Optimierung des Prozesses erfolgreich abgeschlossen. Der letzte Schritt in PinCH besteht nun darin, für beide OCs ein MER HEN (Maximum Energy Recovery Heat Exchanger Network) zu entwerfen. Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht klar ist, welche Wärmeübertrager zwischen den OCs überlappend sind, muss erst ein MER HEN pro OC erstellt werden. Danach kann die Ingenieurin/der Ingenieur im Gesamtdesign entscheiden, welche Wärmeübertrager eingespart werden können.

Fügen Sie, wie bereits in Tutorial 1 erklärt, ein MER HEN zum MOC Supertargeting (Global $\Delta T_{min}$) 1_1 hinzu. Achten Sie darauf, dass im MOC Supertargeting (Global $\Delta T_{min}$) 1_1 das Conventional Design weiterhin aktiviert ist.

☞ Rechtsklick auf MOC Supertargeting (Global $\Delta T_{min}$) 1_1

☞ Add HEN... ☞ Add MER HEN

**Hinweis:** Das HEN des gewünschten OC können Sie durch Auswählen des OC oberhalb des MER HEN anzeigen lassen.

Betrachten wir zunächst OC1: Wir beginnen mit dem Teilsystem unterhalb des Pinch-Punktes. Gemäss den Designregeln zur Erstellung eines MER HEN (vgl. BFE-Handbuch) beginnen wir mit dem grössten Wärmekapazitätsstrom (grösstes $CP$) in Richtung des Pinch-Punktes. In unserem Fallbeispiel ist das der Strom Reactant B ($CP = 6$ kW/K), dessen Heizanforderung wir mit einem möglichst grossen Wärmeübertrager vollständig erfüllen wollen. Hierzu eignet sich der Strom Product C ($CP = 14$ kW/K), welcher über ein genügend grosses Wärmeangebot verfügt. Zur Fertigstellung des MER HEN im Teilsystem unterhalb des Pinch-Punktes verknüpfen wir den Strom Product C mit dem Utility-Strom Cooling Water (CU).

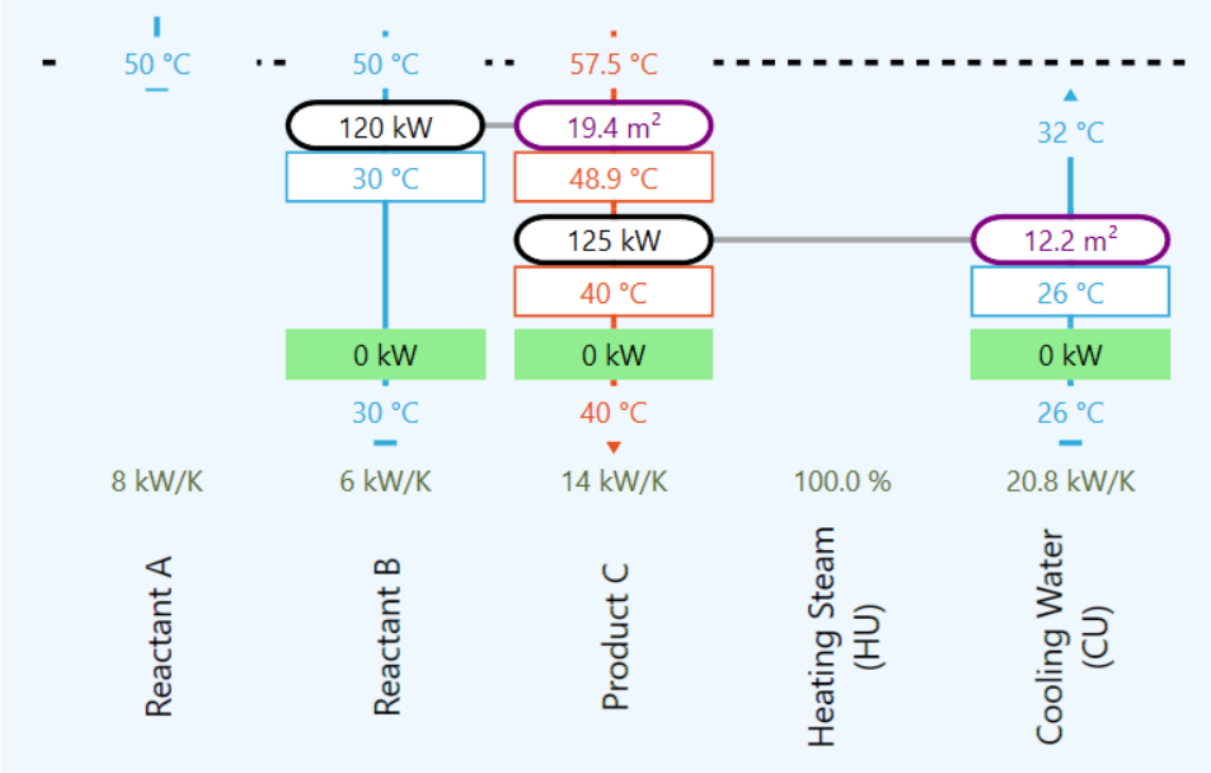



Abbildung 16: MER HEN für OC1 im Teilsystem unterhalb des Pinch-Punktes

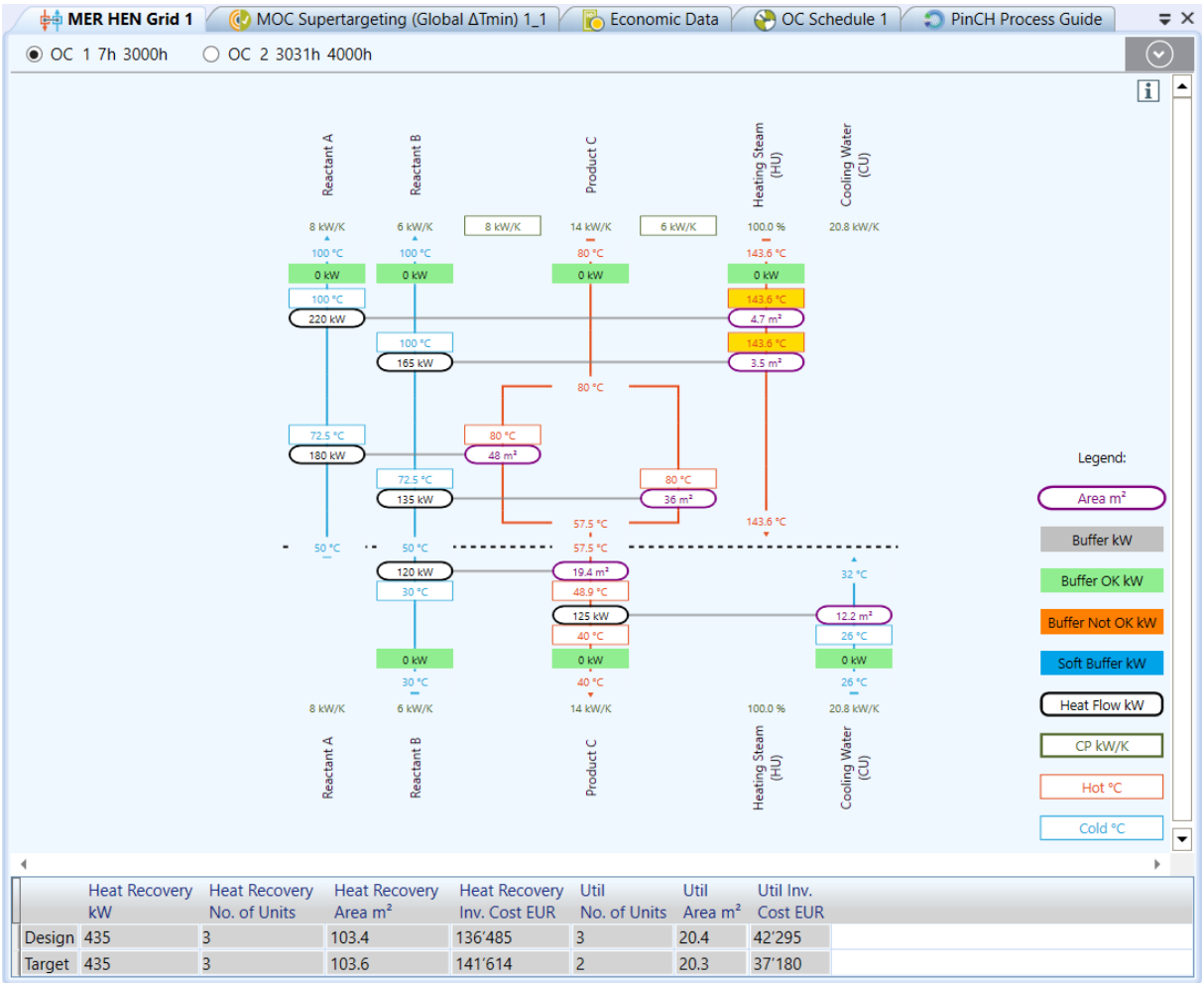
**Hinweis:** Unterhalb des MER HEN können Sie laufend die erreichte Wärmerückgewinnung (Spalte Heat Recovery), die bereits verwendete HEX-Fläche (Heat Recovery Area und Utility Area) und deren Kosten (Heat Recovery Inv. Cost und Utility Inv. Cost) in der Zeile Design nachvollziehen. Als Vergleichsgrössen werden die Target-Daten für das HEN ohne Wiederverwendung von Wärmeübertragern angegeben.

Wenden wir uns dem Teilsystem oberhalb des Pinch-Punktes zu: Bitte versuchen Sie selbstständig die erforderlichen Wärmeübertrager zu platzieren.

Wie Sie sicher bemerkt haben, ist eine Verbindung der Ströme hier nicht ohne Weiteres möglich. Die CP-Regel wird verletzt, der abzukühlende Strom Product C muss daher gesplittet werden. Teilen Sie die Wärmekapazitätsströme auf 6 kW/K und 8 kW/K auf (CP von Product C darf nicht grösser sein als CP von Reactant B). Verbinden Sie jeweils einen Teilstrom des Product C mit den Strömen Reactant A und Reactant B. Bevor wir die Wärmeübertrager setzen, sollten die Äste des gesplitteten Product C wieder vereint werden.

Zur Vervollständigung des MER HEN verknüpfen Sie nun die beiden Ströme Reactant A und Reactant B mit dem Utility-Strom Heating Steam (HU).

Das fertige MER HEN des OC1 sieht wie folgt aus:

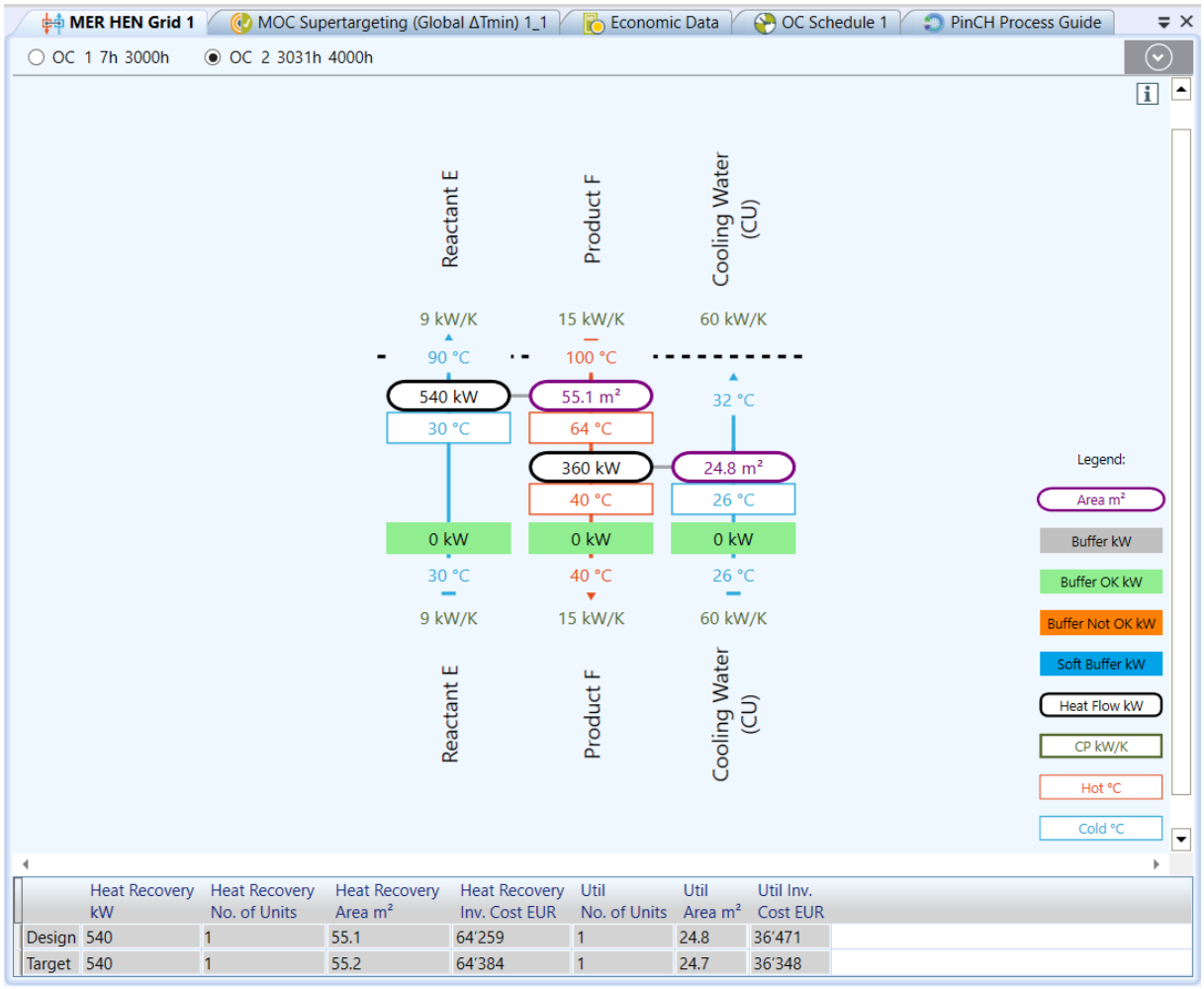



| | Heat Recovery kW | Heat Recovery No. of Units | Heat Recovery Area m² | Heat Recovery Inv. Cost EUR | Util No. of Units | Util Area m² | Util Inv. Cost EUR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Design | 435 | 3 | 103.4 | 136'485 | 3 | 20.4 | 42'295 |
| Target | 435 | 3 | 103.6 | 141'614 | 2 | 20.3 | 37'180 |

Abbildung 17: MER HEN des Betriebsfalls OC1

Versuchen Sie nun selbstständig, das MER HEN für OC2 zu erstellen.

Das fertige MER HEN des OC2 sieht wie folgt aus:




| | Heat Recovery kW | Heat Recovery No. of Units | Heat Recovery Area m² | Heat Recovery Inv. Cost EUR | Util No. of Units | Util Area m² | Util Inv. Cost EUR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Design | 540 | 1 | 55.1 | 64'259 | 1 | 24.8 | 36'471 |
| Target | 540 | 1 | 55.2 | 64'384 | 1 | 24.7 | 36'348 |

Abbildung 18: MER HEN des Betriebsfalls OC2

Nach der Erarbeitung der MER HENs für beide OCs kann der Vergleich zwischen Design und Target gezogen werden:

Für das Design von OC Product C (OC 1) ergeben sich Investitionskosten von 178'780 € (Summe aus Heat Recovery Inv. Cost und Util Inv. Cost). Dies entspricht beinahe exakt den Target-Investitionskosten (Differenz lediglich 14 €).

Für das Design von OC Product F (OC 2) ergeben sich Investitionskosten von 100'730 €, was ebenfalls beinahe exakt den Target-Investitionskosten von 100'732 € entspricht. Die beiden MER HEN Designs kommen den Target-Werten aus Step 8 somit sehr nahe.

## IV. Optimierte Produktionsanlage

Aus der Kombination der beiden MER HENs kann nun ein Verfahrensfliessbild erstellt werden, welches beide OCs abdeckt. Das Ziel ist dabei, die HEXs möglichst in beiden OCs einzusetzen und dadurch die Anzahl der HEXs zu reduzieren. In unserem Fallbeispiel betrifft dies die in den Abbildungen 19 und 20 hellgrün und dunkelgrün markierten HEXs. Der hellgrüne HEX weist in OC Product C eine von PinCH ermittelte HEX-Fläche von 19.4 $m^2$ und in OC Product F von 55.1 $m^2$ auf:

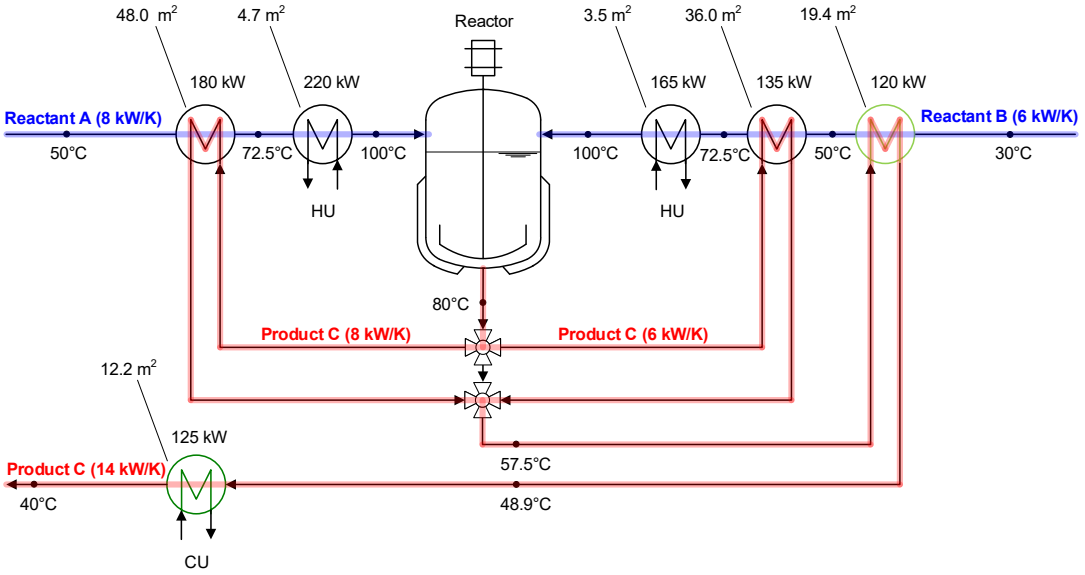



Abbildung 19: Verfahrensfliessbild der optimierten Produktionsanlage. Die Prozessanforderungen des OC Product C (OC 1) sind farbig eingezeichnet.

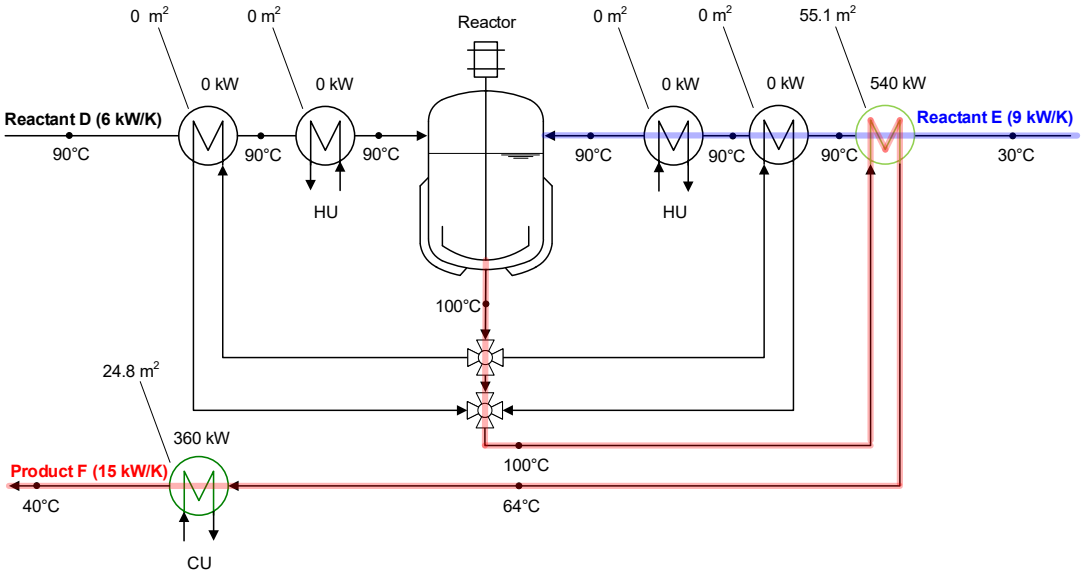



Abbildung 20: Verfahrensfliessbild der optimierten Produktionsanlage. Die Prozessanforderungen des OC Product F (OC 2) sind farbig eingezeichnet.

Um die Prozessanforderungen beider OCs zu erfüllen, wird nun der hellgrüne HEX mit der grösseren Fläche (55.1 m$^2$, OC2) verwendet und die andere Fläche (19.4 m$^2$, OC1) somit eingespart. Dies ergibt eine Kosteneinsparung von 30'635 € durch das Weglassen des hellgrünen HEX.

Der dunkelgrüne HEX mit einer Fläche von 12.2 m$^2$, der Kosten von 22'039 € verursachen würde, kann ebenfalls eingespart werden. Stattdessen wird der HEX aus OC2 in OC1 wiederverwendet. Durch die Wiederverwendung der HEX-Flächen werden im Vergleich zum Separate Design Investitionskosten von 30'635 € + 22'039 € = 52'674 € eingespart.

In Tabelle 6 wird das Design ohne WRG mit dem optimierten Design verglichen:

Tabelle 6: Vergleich der ursprünglich geplanten Anlage ohne WRG mit dem optimierten Design der Anlage

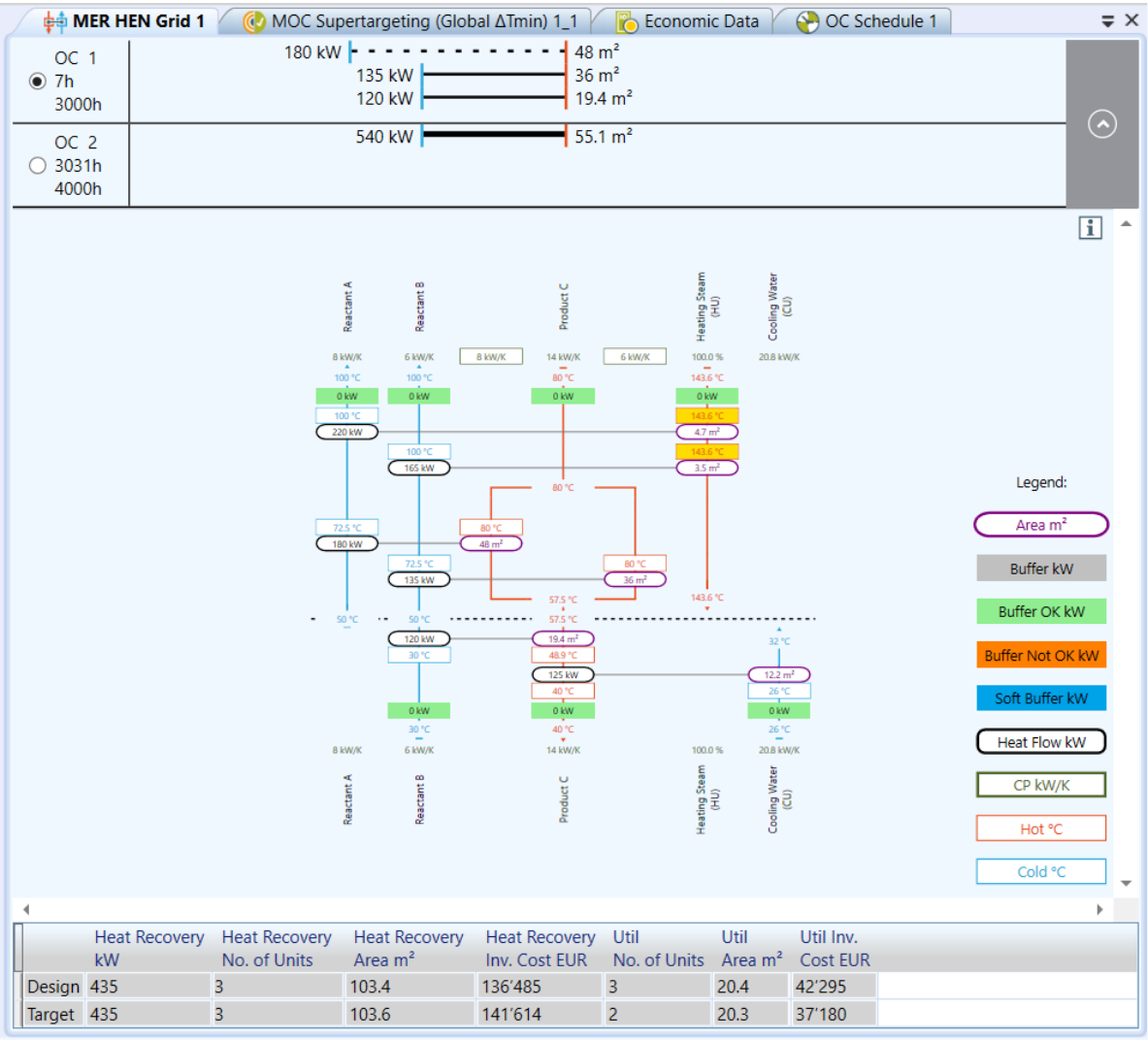
| | HU | | CU | | HEX-Fläche | J. Invest.-kosten | J. Energie-kosten | J. Gesamt-kosten |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [kW] | [MWh/a] | [kW] | [MWh/a] | $A$ [m$^2$] | $A \cdot C_{Inv}$ [€/a] | $C_{En}$ [€/a] | $C_{tot}$ [€/a] |
| Design ohne WRG | | | | | | | | |
| OC 1 | 820 | 2'460 | 560 | 1'680 | - | - | 202'440 | - |
| OC 2 | 540 | 2'160 | 900 | 3'600 | - | - | 216'000 | - |
| Total | - | 4'620 | - | 5'280 | 54.9 | 23'557 | 418'440 | **441'997** |
| Optimiertes Design - Conventional Design | | | | | | | | |
| OC 1 | 385 | 1'155 | 125 | 375 | - | - | 87'600 | - |
| OC 2 | 0 | 0 | 360 | 1'440 | - | - | 25'920 | - |
| Total | - | 1'155 | - | 1'815 | 172.1 | 63'968 | 113'520 | **177'488** |
| **Einsparung (während des Abschreibungszeitraums)** | | | | | | | | |
| OC 1 | 435 | 1'305 | 435 | 1'305 | - | - | 114'840 | - |
| OC 2 | 540 | 2'160 | 540 | 2'160 | - | - | 190'080 | - |
| Total | - | 3'465 | - | 3'465 | -117.2 | -40'411 | 304'920 | **264'509** |

Mit dem optimierten Design lassen sich die jährlichen Gesamtkosten um 264'509 €/a reduzieren. Dies entspricht einer Reduktion um 60 %.

**Hinweis:** Bei der Erarbeitung eines Verfahrensfliessbildes, welches beide OCs abdeckt, unterstützt Sie PinCH mit zwei weiteren HEN Design Tools:

Das **Mini-Map-Tool** findet sich oberhalb des HEN, wenn Sie den Pfeil bei der Auswahl der OCs anklicken. Es zeigt die HEXs zwischen Prozessströmen im aktivierten OC und zusätzlich die HEXs derselben Leitungen aller anderen OCs. Die HEXs werden entweder als gestrichelte schwarze Linie (wenn keine weiteren HEXs zwischen den benutzten Leitungen existieren), als schwarze Linie (wenn weitere HEXs zwischen den benutzten Leitungen existieren) oder als dicke schwarze Linie (für den HEX, der die grösste HEX-Fläche besitzt, wenn ein oder mehrere HEXs zwischen den benutzten Leitungen existieren) dargestellt.

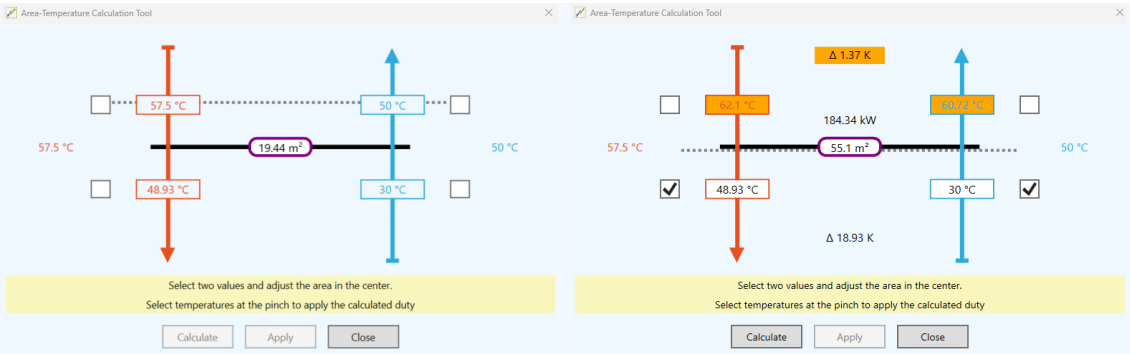
In der Mini-Map im unteren Bild ist ersichtlich, dass der HEX mit einer HEX-Fläche von 55.1 m$^2$ aus OC 2 theoretisch zwei weitere HEX in OC 1 ersetzen könnte. Die weitere Analyse beginnt mit dem HEX mit 19.4 m$^2$.




| | Heat Recovery kW | Heat Recovery No. of Units | Heat Recovery Area m² | Heat Recovery Inv. Cost EUR | Util No. of Units | Util Area m² | Util Inv. Cost EUR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Design | 435 | 3 | 103.4 | 136'485 | 3 | 20.4 | 42'295 |
| Target | 435 | 3 | 103.6 | 141'614 | 2 | 20.3 | 37'180 |

Nun wäre es interessant zu sehen, welche Auswirkungen eine Vergrösserung der HEX-Fläche von 19.4 m² auf 55.1 m² des zu ersetzenden HEX hätte. Genau diese Anforderung erfüllt das zweite Tool.

Mit dem **Area-Temperature Calculation Tool** können die Eintritts- und Austrittstemperaturen, die HEX-Fläche und das $\Delta T$ eines HEX genauer untersucht werden. Um es zu öffnen, klicken Sie mit der rechten Maustaste auf den zu untersuchenden HEX direkt im HEN und wählen Sie Display Area-Temperature Tool (alternativ Doppelklick auf einen der beiden Heater/Cooler). Durch Anklicken der Kontrollkästchen neben den Temperaturen können zwei Temperaturen des HEX fixiert werden. In der Mitte wird anschliessend die HEX-Fläche von 19.4 m² auf 55.1 m² geändert. Durch Klicken auf die Schaltfläche Calculate kann getestet werden, was bei der Erhöhung der HEX-Fläche passiert.




Erstens unterschreitet der HEX das $\Delta T_{min}$. Anstelle eines $\Delta T$ von mindestens 7.50 K resultiert ein $\Delta T$ des HEX von 1.37 K. Zweitens wird durch den vergrösserten HEX Wärme über den Pinch-Punkt transferiert (vgl. Pinch-Hauptregeln im BFE-Handbuch).

Wie das endgültige Design ausgearbeitet werden muss, obliegt der Ingenieurin/dem Ingenieur. In diesem Fall sollte untersucht werden, ob ein Bypass verwendet werden kann, um die Temperaturanforderungen einzuhalten.

### Vielen Dank für Ihre Zeit!

Sie sind nun mit den elementaren Schritten vertraut, um eine Pinch-Analyse eines Prozesses mit verschiedenen Betriebsfällen mit PinCH durchzuführen. Wann immer Sie Fragen haben, können Sie sich gerne an uns wenden. Das PinCH-Team der Hochschule Luzern sowie das Centre de Compétence PinCH Francophone der Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud stehen Ihnen gerne zur Verfügung.

Bitte beachten Sie auch die Möglichkeit eines Coachings zur Begleitung und Qualitätssicherung Ihrer Pinch-Analysen. Mit diesem „Learning by Doing" haben wir bereits mehrfach ausgezeichnete Erfahrungen gesammelt. In jedem Fall wünschen wir Ihnen weiterhin viel Spass und Erfolg mit PinCH und bedanken uns herzlich für Ihre Zeit!

Für weitere Informationen besuchen Sie bitte unsere Website www.pinch.ch. Nachfolgend finden Sie unsere Kontaktdaten.

Ihr PinCH-Team der Hochschule Luzern

## Kontakt

**Deutsch und Englisch:**
Hochschule Luzern
Technik und Architektur
Kompetenzzentrum Thermische
Energiesysteme und Verfahrenstechnik
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
pinch@hslu.ch

**Französisch:**
Haute Ecole d'Ingénierie et de
Gestion du Canton de Vaud
Institut de Génie Thermique
Centre de compétence PinCH francophone
Avenue des Sports 20
CH-1401 Yverdon-les-Bains
pinch@heig-vd.ch

Dieses Werk (nachfolgend „Tutorial") dient zur Einführung in die Software PinCH der Hochschule Luzern/Fachhochschule Zentralschweiz. Das Tutorial ist kostenlos unter www.pinch.ch verfügbar. Es darf nicht kommerziell weiterverbreitet werden. Die Nutzung des Tutorials in kommerziellen Aus- und Weiterbildungskursen, Workshops, Coachings usw. ist nicht gestattet. Die Modifikation des Tutorials ist nicht gestattet.