

PinCH Tutorial 1

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 fünf Tutorials werden Grundlagen der Energie- und Kostenoptimierung von industriellen Prozessen mit [PinCH](#) vermittelt:

PinCH Tutorial 0	Quick Overview
PinCH Tutorial 1	Kontinuierliche Produktionsanlage
PinCH Tutorial 2	Produktionsanlage mit mehreren Betriebsfällen
PinCH Tutorial 3	Nicht-kontinuierliche Produktionsanlage
PinCH Tutorial 4	Integration thermischer Energiespeicher

Die Tutorials sind aufbauend gestaltet. Wenn Sie [PinCH](#) zum ersten Mal benutzen, empfehlen wir Ihnen, mit [Tutorial 0](#) zu starten.

Auf der Website www.pinch-analyse.ch können die Tutorials und die dazugehörigen "fertigen" PinCH-Files heruntergeladen werden. Die Tutorials können mit der Trial-Version von [PinCH](#) gelöst werden (Vollversion, jedoch limitiert auf 8 Prozess-Ströme). Um die Trial-Version zu erhalten, schreiben Sie bitte eine E-Mail an pinch@hslu.ch.

Die Tutorials sind auf Deutsch, Englisch und Französisch erhältlich. Die Beschriftungen in Verfahrensflussbildern, die Bezeichnungen von Prozessen, Strömen usw. sowie software-bezogene 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](#) Quick Overview.

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-analyse.ch)
- R. Smith: Chemical Process Design and Integration. 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2016; Pinch-Analyse ab Kap. 15 (ISBN 9781119990130)
- 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 das [PinCH Tutorial 1](#) vor sich. Darin geht es um die Analyse und Optimierung einer Produktionsanlage in der chemischen Industrie. Es handelt sich um einen kontinuierlich betriebenen Prozess. Das [Tutorial 1](#) ist wie folgt aufgebaut:

Inhaltsverzeichnis

I. Einführung Tutorial 1	2
II. Fallbeispiel: Chemischer Prozess	3
III. 10 Steps in PinCH	7
IV. Optimierter Prozess	26

I Einführung [Tutorial 1](#)

Lernziel: Durchführung einer Pinch-Analyse für einen kontinuierlichen Prozess mit [PinCH](#).

Dauer: 2-3 Stunden

Für den Einstieg in die Software betrachten wir in [Tutorial 1](#) einen kontinuierlichen Prozess. Das Fallbeispiel wurde aus didaktischen Gründen vereinfacht. Das Tutorial führt Sie Schritt für Schritt durch die Pinch-Analyse und Sie lernen dabei die Bedienung und die Möglichkeiten der Software kennen. Für die Energie- und Kostenoptimierung eines kontinuierlichen Prozesses durchlaufen Sie folgende Schritte (die [Steps 2, 7](#) und [9](#) werden für dieses Fallbeispiel nicht benötigt):

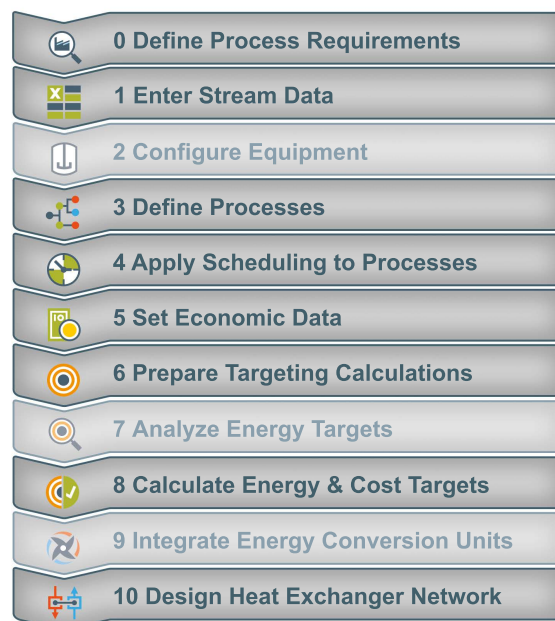


Abbildung 1: Ablauf in [PinCH](#) für die Optimierung eines kontinuierlichen Prozesses

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

II Fallbeispiel: Chemischer Prozess

Prozessbeschreibung

In einer Produktionsanlage der Feinchemie AG werden zur Herstellung einer Grundchemikalie zwei Edukte (Reactant A und Reactant B) in einem Reaktor zur Reaktion gebracht. Anschliessend wird das Reaktionsgemisch (Reaction Mixture) in einer Destillationskolonne in das Produkt (Product C) sowie einen Recycling-Strom (Recycling Stream) aufgetrennt. Das Reaktionsgemisch wird vor dem Eintritt in die Kolonne erwärmt. Das Produkt und der Recycling-Strom werden nach der Kolonne abgekühlt. Das Verfahrensfliessbild der Anlage ist in Abbildung 2 dargestellt. Die für die Pinch-Analyse relevanten Prozessparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

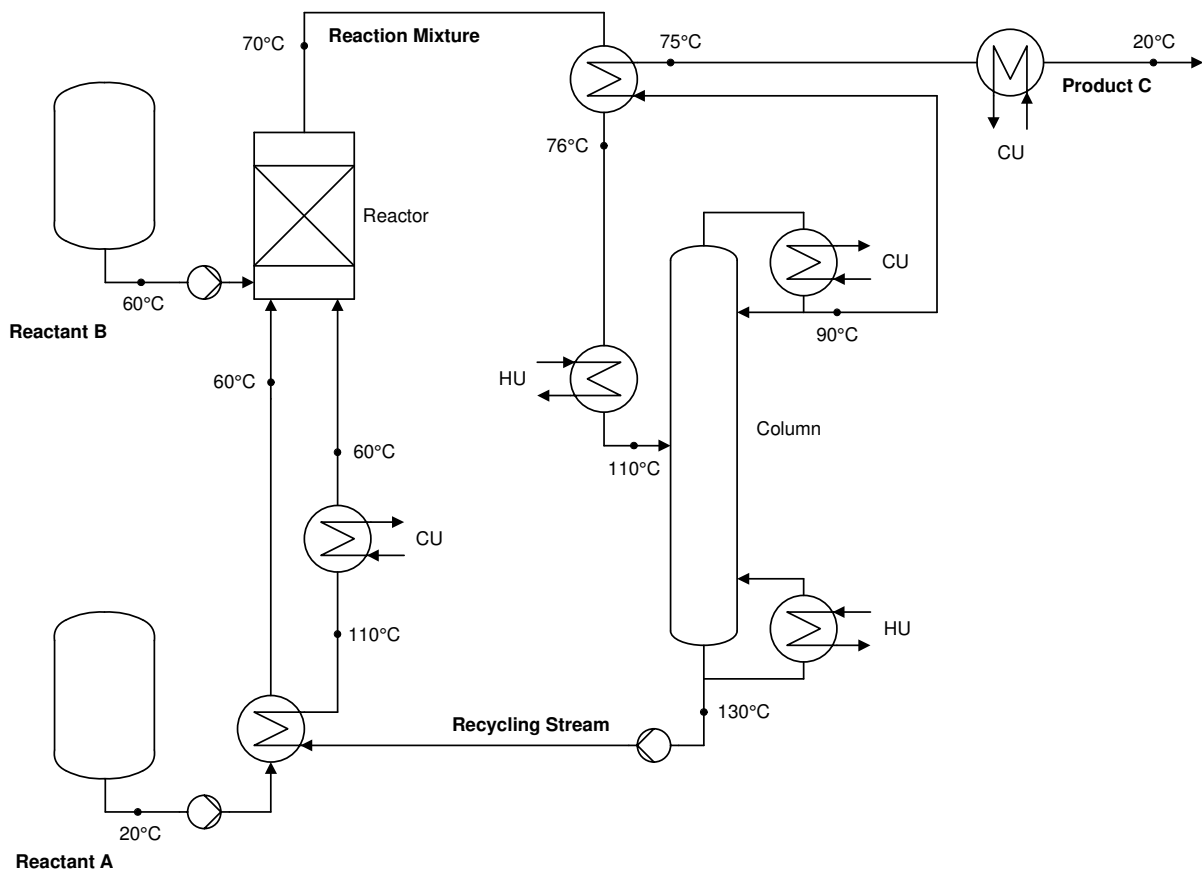


Abbildung 2: Verfahrensfliessbild der bestehenden Produktionsanlage

Tabelle 1: Prozess-Ströme

Prozess-Strom	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/(kg K)]	α [W/(m ² K)]
Edukt A (Reactant A)	1.0	2.5	1'000
Edukt B (Reactant B)	0.5	1.9	1'000
Reaktionsgemisch (Reaction Mixture)	4.0	2.4	1'000
Produkt C (Product C)	1.5	2.5	1'000
Recycling-Strom (Recycling Stream)	2.5	2.0	1'000

Zeitplan (Scheduling)

Die Produktionsanlage wird während 7'000 h/a kontinuierlich betrieben. In Abbildung 3 ist das Gantt-Diagramm der Produktionsanlage ersichtlich.

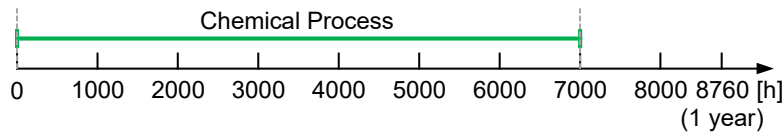


Abbildung 3: Gantt-Diagramm

Energieversorgung (Utilities)

Für das Heizen und Kühlen der Prozess-Ströme stehen die **Utilities** aus Tabelle 2 zur Verfügung. Als Hot Utility (HU) wird Heizdampf (Heating Steam) verwendet. Der Heizdampf liegt als Sattdampf vor, daher ist der Dampfgehalt x am Ein- und Austritt und der Druck p angegeben. Als Cold Utility (CU) wird Kühlwasser (Cooling Water) verwendet. Dieses wird mit einer Kälteanlage bereitgestellt.

Tabelle 2: Utility-Daten

Utility-Strom	T_{in} [°C]	T_{out} [°C]	p [bar(a)]	α [W/(m ² K)]	c [€/MWh]
Heating Steam (HU)	$x=1$	$x=0$	4	5'000	70
Cooling Water (CU)	6	12	3	2'000	40

Die jährlichen Betriebskosten C_{Op} [€/a] entsprechen unter Vernachlässigung von Wartungs- und Personalkosten den Energiekosten C_{En} [€/a]. Die jährlichen Betriebskosten werden nach Gleichung 1 berechnet. Dabei entspricht τ [h/a] den jährlichen Betriebsstunden, \dot{Q} [kW] dem Bedarf an HU / CU und c [€/MWh] den spezifischen Kosten der HU / CU.

$$C_{Op} = C_{En} = \tau \cdot \left(\dot{Q}_{HU} \cdot c_{HU} + \dot{Q}_{CU} \cdot c_{CU} \right) \quad (1)$$

Die bestehende Anlage benötigt $\dot{Q}_{HU} = 326$ kW an HU und $\dot{Q}_{CU} = 456$ kW an CU. Daraus ergeben sich jährliche Betriebskosten von $C_{Op} = C_{En} = 287'420$ €/a.

Investitionskosten

In unserem Fallbeispiel sind nur die Investitionskosten C_{HEN} der Wärmeübertrager (Heat Exchanger, HEX) für die Wärmerückgewinnung (WRG) und die Energieversorgung (Utilities) zu berücksichtigen. Wenn zusätzlich ein Energieumwandlungssystem (Energy Conversion Unit, ECU) wie z. B. ein Blockheizkraftwerk oder eine Wärmepumpe in den Prozess integriert wird, müssen deren Investitionskosten C_{ECU} miteinbezogen werden. Da wir in diesem Tutorial keine ECUs betrachten, gilt für die gesamten Investitionskosten C_{Inv} :

$$C_{Inv} = C_{HEN} + C_{ECU} \quad \text{mit} \quad C_{ECU} = 0 \quad (2)$$

Die Kosten für das Wärmeübertrager-Netzwerk (Heat Exchanger Network, HEN) berechnet sich als Summe der Kosten C_{HEX} für die einzelnen HEX. In PinCH werden die HEN-Kosten wie folgt berechnet:

$$C_{HEN} = \sum_{HEX} C_{HEX} = \sum_{HEX} \left(C_0 + C_b \cdot \left(\frac{A_{HEX}}{A_b} \right)^m \right) \quad (3)$$

In diesem Fallbeispiel verwenden wir folgende Werte:

- Grundkosten des HEX (unabhängig von der Wärmeübertragungsfläche): $C_0 = 0 \text{ €}$
- Kosten für einen Referenz-HEX ($b = \text{base}$): $C_b = 110'000 \text{ €}$
- Wärmeübertragungsfläche des Referenz-HEX: $A_b = 100 \text{ m}^2$
- Degressionsexponent: $m = 0.71$

Gleichung 3 beschreibt dementsprechend die Kosten eines HEX basierend auf der entsprechenden Wärmeübertragungsfläche A in Abhängigkeit eines Referenz-HEX mit den Referenzkosten $C_b = 110'000 \text{ €}$ für eine Referenzfläche $A_b = 100 \text{ m}^2$.

Bei den Investitionskosten handelt es sich um die Gesamtkosten für den installierten und in Betrieb genommenen HEX.

Die HEX-Fläche A wird in PinCH nach Gleichung 4 berechnet. Der Wärmedurchgangskoeffizient k wird unter Vernachlässigung des Wärmeleitwiderstandes der Wand des HEX aus den beiden Wärmeübergangskoeffizienten α der Ströme und der mittleren Temperaturdifferenz ΔT_m berechnet (siehe [BFE-Handbuch](#)).

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T_m} \quad \text{mit} \quad \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (4)$$

Gesamtkosten

Die jährlichen Gesamtkosten C_{tot} [€/a] setzen sich aus den jährlichen Investitionskosten sowie den jährlich Betriebskosten zusammen. Dabei ist a der Annuitätsfaktor.

$$C_{tot} = a \cdot C_{Inv} + C_{Op} \quad \text{mit} \quad a = \frac{Z \cdot (1 + Z)^n}{(1 + Z)^n - 1} \quad (5)$$

In diesem Fallbeispiel verwenden wir folgende Werte:

- Zinsfaktor (Interest Rate): $Z = 6 \%$
- Amortisationszeit (Pay off Period): $n = 3 \text{ a}$

Da wir eine bestehende Produktionsanlage betrachten und wir annehmen, dass die Anlage bereits abgeschrieben ist, fallen vor der Umsetzung von Optimierungsmassnahmen nur Betriebskosten an, also gilt $C_{tot} = C_{Op} = 287'420 \text{ €/a}$.

Problemstellung

In der Produktionsanlage sind bereits Massnahmen zur prozessinternen WRG umgesetzt worden. Mittels Pinch-Analyse soll der Prozess auf weitere WRG-Potenziale untersucht werden. PinCH bietet Ihnen eine Hilfestellung, um systematisch die optimale Lösung zu erarbeiten. Nach dem Leitsatz der Pinch-Analyse **Targets before Design!** werden zunächst die Energie- und Kostenziele berechnet und anschliessend ein HEN entworfen.



Step 0: Define Process Requirements

Bevor wir mit der Dateneingabe in PinCH beginnen, wollen wir zunächst die Grundlagen für eine Pinch-Analyse erarbeiten und die [Prozessanforderungen](#) definieren.

Zusatzinformation: Eine Prozessanforderung gemäss Pinch-Analyse beschreibt eine Heizanforderung (Wärmebedarf) bzw. eine Kühlanforderung (Kühlbedarf) für ein bestimmtes Medium (z. B. Zuluft, Kühlwasser, Lösungsmittel). Meistens handelt es sich um einen Stoffstrom, mit einem Massenstrom \dot{m} , einer spezifischen Wärmekapazität c_p sowie einer Ein- und Austrittstemperatur T_{in} bzw. T_{out} .

Die Basis für das Definieren von Prozessanforderungen ist das Extrahieren der Stromdaten aus den Verfahrensfliessbildern, Anlagenbeschreibungen, Betriebsunterlagen, etc. Wir empfehlen Ihnen, sich mit den Prinzipien der Datenextraktion vertraut zu machen (siehe [BFE-Handbuch](#)).

Versuchen Sie, die für die Pinch-Analyse relevanten Stromdaten aus der Anlagenbeschreibung und dem dazugehörigen Verfahrensfliessbild auf Seite 3 zu extrahieren und die Prozessanforderungen zu formulieren. Beachten Sie dabei, dass die Feinchemie AG aus betrieblichen Gründen den Verdampfer und Kondensator der Kolonne nicht in die Pinch-Analyse miteinbeziehen möchte.

Das Ergebnis der Datenextraktion sind die Prozessanforderungen, welche in Tabelle 3 und Abbildung 4 ersichtlich sind.

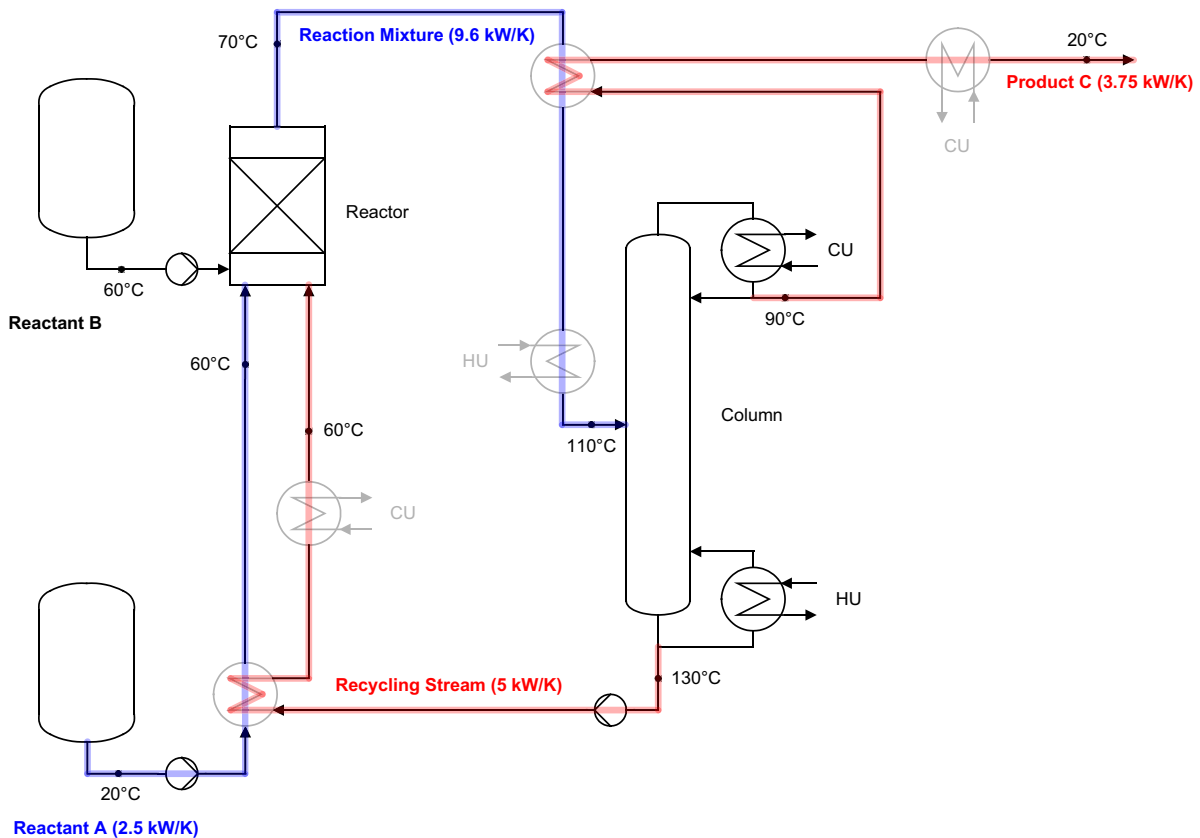


Abbildung 4: Prozessanforderungen

Tabelle 3: Prozessanforderungen

Process Stream	T_{in} [°C]	T_{out} [°C]	α [W/(m ² K)]	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/(kg K)]
Reactant A	20	60	1'000	1.0	2.5
Reaction Mixture	70	110	1'000	4.0	2.4
Product C	90	20	1'000	1.5	2.5
Recycling Stream	130	60	1'000	2.5	2.0

Zusatzinformation: Da das Edukt B (Reactant B) bereits mit 60 °C in den Prozess einfließt, muss dieses nicht erwärmt werden. Dadurch entsteht keine Prozessanforderung für das Edukt B.






III 10 Steps in PinCH

Los geht's!

Zum Starten öffnen Sie [PinCH](#). Bevor wir mit dem eigentlichen Projekt beginnen, empfiehlt es sich die Grundeinstellungen in [PinCH](#) zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Da in unseren Tutorials die Kosten in € angegeben werden, müssen Sie unter Umständen in den Einstellungen die Währung anpassen. Des Weiteren wird in diesem Tutorial mit den Einheiten in kW und MWh gearbeitet. Wie Sie dabei vorgehen müssen, wird im [Tutorial 0](#) erläutert.

Das Tutorial folgt den [10 PinCH Steps](#) (vgl. [Tutorial 0](#)). In den [Steps 1-5](#) werden die prozessrelevanten Daten im [Project Explorer](#) erfasst. In den [Steps 6-10](#) erfolgt die Optimierung der Anlage im [Target Explorer](#).

Erstellen Sie ein neues Projekt und benennen Sie es "Chemical Process". Gehen Sie dabei wie folgt vor:

-  [File](#)  [New Project](#)
-  Im [Project Explorer](#) [New PinCH Project](#) anklicken
-  F2-Taste drücken
-  Projektname in "Chemical Process" ändern



Step 1: Enter Stream Data

Die definierten Prozessanforderungen werden in die [Process Stream Table](#) eingetragen.

Öffnen Sie die [Process Stream Table](#), indem Sie die

-  Registerkarte [Process Stream Table](#) anklicken.

Möglich ist auch:

-  Doppelklick auf [Process Stream Table](#) im [Project Explorer](#)

Sie fügen einen kontinuierlichen Prozess-Strom hinzu, indem Sie

-  das Icon  anklicken.

Alternativ ist folgende Vorgehensweise möglich:

- ☞ Rechtsklick ins leere Feld der Registerkarte Process Stream Table
- ☞ Add Continuous Process Stream wählen (siehe Abbildung 5).

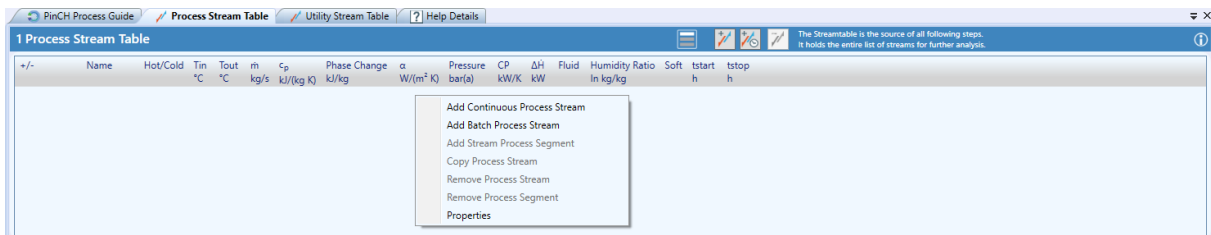


Abbildung 5: Hinzufügen eines kontinuierlichen Prozess-Stroms in der Process Stream Table

Die Benennung der Prozess-Ströme und Eingabe der Daten erfolgt nach folgendem Ablauf:

- ☞ New Process Stream 1 anklicken
- ☞ Geben Sie Ihrem Prozess-Strom einen passenden Namen, z. B. "Reactant A".
- ☞ Wählen Sie die weiteren Zellen an, um die Werte für T_{in} , T_{out} , \dot{m} , c_p und α zu ändern. Beachten Sie die Einheiten der Grössen.

Hinweis: Sie können auch mit der Tabulatortaste von Zelle zu Zelle springen.

Haben Sie bemerkt, wie bei der Eingabe eines aufzuheizenden Stroms der rote Pfeil in der Spalte Hot/Cold in einen blauen Pfeil übergeht? In der Pinch-Analyse nennen wir einen aufzuheizenden Strom (Wärmebedarf) einen Cold Stream, einen abzukühlenden Strom (Kühlbedarf) einen Hot Stream.

Hinweis: Sie können einen Prozess-Strom löschen, indem Sie den

- ☞ zu löschenden Prozess-Strom anwählen und anklicken.

Alternativ ist folgendes Vorgehen möglich:

- ☞ Rechtsklick auf den zu löschenden Prozess-Strom
- ☞ Remove Process Stream wählen

Die vollständige Process Stream Table sieht folgendermassen aus:

+/-	Name	Hot/Cold	T _{in} °C	T _{out} °C	\dot{m} kg/s	c_p kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m ² K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	ΔH kW	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg	Soft	tstart h	tstop h
	Reactant A	↕	20	60	1	2.5	-	1000	-	2.5	100	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Product C	↗	90	20	1.5	2.5	-	1000	-	3.75	262.5	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Recycling Stream	↗	130	60	2.5	2	-	1000	-	5	350	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Reaction Mixture	↕	70	110	4	2.4	-	1000	-	9.6	384	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-

Abbildung 6: Process Stream Table

Hinweis: In der Spalte Fluid können verschiedene Fluide angewählt werden, so dass für diese die Eingabe der spezifischen Wärmekapazität (c_p) und, falls relevant, die Verdampfungsenthalpie (Phase Change) entfällt. Zusätzlich ist dann jedoch die Angabe des Drucks (Pressure) notwendig. Die Spalte Humidity Ratio (absolute Feuchtigkeit) ist nur für feuchte Luft (Humid Air) auszufüllen. Ist in der Spalte Fluid "Simple" aufgeführt, können sämtliche Daten manuell eingegeben werden. Das in der Spalte **Soft** befindliche Kontrollkästchen zur Definition eines Soft Streams sowie die Spalten **tstart** und **tstop**, um den zeitlichen Ablauf eines diskontinuierlichen Prozess-Streams (Batch Process Stream) zu charakterisieren, sind in diesem Fallbeispiel nicht relevant.

Die Process Stream Table ist eine dynamische Tabelle. Wie Sie sicher bemerkt haben, berechnet PinCH aus den eingetragenen Werten für T_{in} , T_{out} , \dot{m} , c_p den Wärmekapazitätsstrom CP und die erforderliche Enthalpiestromdifferenz $\Delta\dot{H}$. Sie können auch andere Daten eingeben, z. B. T_{in} , T_{out} , c_p und $\Delta\dot{H}$; in diesem Fall wird der Massenstrom \dot{m} berechnet. Bei den grün markierten Zellen handelt es sich um berechnete Werte. Der Wärmekapazitätsstrom CP (in kW/K) ist das Produkt aus Massenstrom und spezifischer Wärmekapazität.

Hinweis: Prozess-Ströme können übrigens auch aus einer Excel-Tabelle importiert werden:

 File  [Import Stream Table](#)

Damit die Formatierung der Tabelle korrekt ist, exportieren Sie am besten zuerst eine leere Process Stream Table aus PinCH, die Sie dann in Excel bearbeiten und anschliessend wieder in PinCH importieren.

 File  [Export Stream Table](#)

In einem zweiten Schritt müssen die zur Verfügung stehenden **Utilities** (Heiz- und Kühlmedien) in die **Utility Stream Table** eingetragen werden. Ein Prozess in PinCH benötigt mindestens zwei Utilities, nämlich eine HU, die "heiss genug ist", und eine CU, die "kalt genug ist".

Öffnen Sie die Utility Stream Table, indem Sie die


 Registerkarte Utility Stream Table im Hauptfenster anklicken.

Alternativ können Sie die Utility Stream Table über den Target Explorer aufrufen:

 Doppelklick auf Utility Stream Table (im Target Explorer)

Sie fügen einen Utility-Stream hinzu, indem Sie

  anklicken

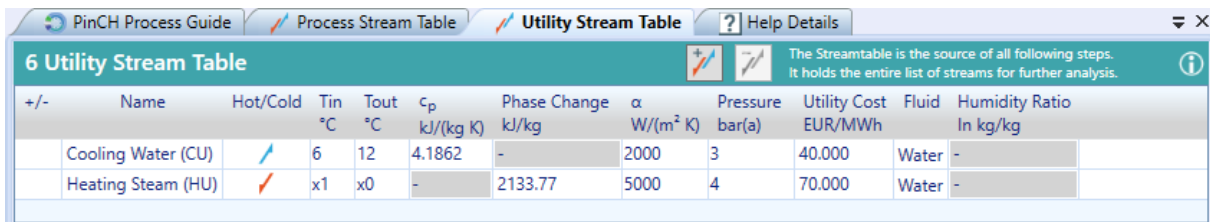
 Benennen Sie die Utility-Ströme und ändern Sie die Default-Werte gemäss den Vorgaben in Tabelle 2 auf Seite 4.

Wie in der Process Stream Table können Sie in der Spalte Fluid verschiedene Fluide anwählen. Als Utility werden oft Wasser (Heizdampf, Kühlwasser) oder Kältemittel (R134a, R717, usw.) verwendet. Kondensierende oder verdampfende Medien können mit dem Dampfgehalt x am Ein- und Austritt und dem Druck p beschrieben werden. Wählen Sie für den Heizdampf und das Kühlwasser in der Spalte Fluid "Water". Für den kondensierenden Heizdampf (Sattdampf), der nicht unterkühlt, tragen wir $x1$ ($x = 100\%$, Taulinie) in die Spalte T_{in} und $x0$ ($x = 0\%$, Siedelinie) in die Spalte T_{out} ein. Ein

Dampfgehalt von 50 % (Nassdampf) wird durch die Angabe $x0.5$ wiedergegeben. Beachten Sie zudem, dass der Dampfgehalt erst nach der Auswahl von "Water" in der Spalte Fluid eingetragen werden kann. Der Dampfgehalt kann ebenso für die Kältemittel definiert werden, nicht aber für das Fluid "Simple". Tragen Sie weiter die spezifischen Energiekosten (EUR/MWh) in die Tabelle ein.

Hinweis: Über die Utility Cost werden später die jährlichen Energiekosten berechnet.

Die vollständige Utility Stream Table sieht folgendermassen aus:



+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	c_p kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m ² K)	Pressure bar(a)	Utility Cost EUR/MWh	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg
	Cooling Water (CU)	Blue arrow	6	12	4.1862	-	2000	3	40.000	Water	-
	Heating Steam (HU)	Red arrow	x1	x0	-	2133.77	5000	4	70.000	Water	-

Abbildung 7: Utility Stream Table



Step 2: Configure Equipment

In PinCH beschreibt ein **Equipment** eine Leitung, einen Kanal oder einen Apparat (z. B. Rührbehälter), in dem ein Strom bzw. eine Prozessanforderung vorkommt. Es gibt einige Beispiele, in welchen mehrere Prozess-Ströme dasselbe Equipment nutzen (vorausgesetzt die Prozess-Ströme existieren nicht zur selben Zeit). Die Zuteilung mehrerer Prozess-Ströme auf ein gemeinsam nutzbares Equipment verhindert bei der Berechnung der notwendigen HEX-Fläche eine doppelte Kalkulation.

Zusatzinformation: Für Batch-Prozesse kommt Step 2 eine weitere Bedeutung zu. Durch das Definieren von Equipments ist es in PinCH möglich, das zeitliche Überlappen von Batch-Zyklen hinsichtlich Anlagenauslastung zu untersuchen. Detaillierte Informationen und praktische Beispiele zum Zuweisen der Prozess-Ströme auf Equipments finden Sie im BFE-Handbuch.

Da wir im [Tutorial 1](#) einen kontinuierlichen Prozess betrachten, ist eine Zuweisung der Prozess-Ströme auf verschiedene Equipments nicht nötig. Dieser Schritt wird in den [Tutorials 2](#) und [3](#) erläutert.



Step 3: Define Processes

Zur Optimierung des Energieeinsatzes in Industriebetrieben, die mehrere räumlich und technisch unabhängige Anlagen betreiben, können Sie mehrere Prozesse definieren. Ein einzelner Prozess ist letztlich nichts anderes als ein "Cluster von Prozess-Strömen". Die Definition mehrerer Prozesse erlaubt es, verschiedene Szenarien zu betrachten: Die Prozesse können einzeln oder es können Gruppen von Prozessen optimiert werden. Die Optimierung des Gesamtsystems (d.h. alle Prozesse zusammen) ist ebenfalls möglich. Eine solche Anlage wird in dem [Tutorial 2](#) behandelt.

In unserem Fallbeispiel ist eine Aufteilung der in der Process Stream Table definierten Prozess-Ströme auf verschiedene Prozesse nicht notwendig. Verwenden Sie den von PinCH automatisch vordefinierten Prozess [Process 1](#) und benennen Sie diesen in "Chemical Process" um.

 Im Project Explorer [Process 1](#) anklicken (unter BaseCase  Processes)

 F2-Taste drücken

Name in "Chemical Process" ändern

Weisen Sie dem Prozess "Chemical Process" die entsprechenden Prozess Ströme zu.

Doppelklick auf [Chemical Process](#) (unter BaseCase Processes)

Prozess-Strom in der Process Stream Table im oberen Halbfenster anklicken

anklicken

Hinweis: Alternativ kann ein Prozess-Strom mit Drag & Drop zugewiesen werden. Mehrere Prozess-Ströme können durch Gedrückthalten der Ctrl-Taste selektiert werden.

Führen Sie dieses Vorgehen für alle Prozess-Ströme durch. Der vollständig definierte Prozess sieht folgendermassen aus:

The screenshot shows two tables from the PinCH software interface. The top table, '1 Process Stream Table', lists four streams: Reactant A, Product C, Recycling Stream, and Reaction Mixture. The bottom table, '3 Process Streams - Chemical Process', lists the same four streams in a different order: Reaction Mixture, Recycling Stream, Product C, and Reactant A. Both tables have columns for Name, Hot/Cold status, temperatures (Tin, Tout), mass flow (m), specific heat (cp), phase change, thermal conductivity (alpha), pressure, heat capacity (CP), enthalpy change (delta H), fluid type, humidity ratio, and start/stop times (tstart, tstop).

+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	m kg/s	cp kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	alpha W/(m² K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	ΔH kW	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg	Soft	tstart h	tstop h
	Reactant A		20	60	1	2.5	-	1000	-	2.5	100	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Product C		90	20	1.5	2.5	-	1000	-	3.75	262.5	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Recycling Stream		130	60	2.5	2	-	1000	-	5	350	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Reaction Mixture		70	110	4	2.4	-	1000	-	9.6	384	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-

+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	m kg/s	cp kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	alpha W/(m² K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	ΔH kW	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg	Soft	tstart h	tstop h
	Reaction Mixture		70	110	4	2.4	-	1000	-	9.6	384	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Recycling Stream		130	60	2.5	2	-	1000	-	5	350	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Product C		90	20	1.5	2.5	-	1000	-	3.75	262.5	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Reactant A		20	60	1	2.5	-	1000	-	2.5	100	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-

Abbildung 8: "Chemical Process" mit zugewiesenen Prozess-Strömen

Hinweis: Um einen Prozess-Strom aus der Tabelle "3 Process Streams - Chemical Process" zu entfernen, können Sie

den Prozess-Strom anwählen und anklicken

Alternativ können Sie

Rechtsklick auf den zu entfernenden Prozess-Strom und

[Deassign Process Stream](#) wählen



Step 4: Apply Scheduling to Processes

[Schedules](#) werden zur Beschreibung des zeitlichen Ablaufs der in [Step 3](#) definierten Prozesse benötigt. Da es sich bei unserem Fallbeispiel um einen kontinuierlichen Prozess handelt, sind die jährlichen Betriebsstunden die einzige Angabe die hier benötigt werden.

Zusatzinformation: Haben Sie mehrere Prozesse definiert, liegen i. d. R. mehrere Betriebsfälle / Multiple Operating Cases (MOC) vor, während denen unterschiedliche Heiz- und Kühlanforderungen existieren. In diesen Fällen müssen Schedules ausführlich beschrieben werden. Das entsprechende Vorgehen wird in den Tutorials 2 und 3 näher erläutert. Im Falle eines Batch-Prozesses (diskontinuierliche Prozess-Ströme) existieren bereits mehrere Operating Cases für einen Prozess. Wir nennen diese dann Time Slices. Die Beschreibung des zeitlichen Ablaufs eines Batch-Prozesses enthält entsprechend mehr Informationen.

Kommen wir zurück zum Fallbeispiel: Für einen einzelnen kontinuierlichen Prozess (es gibt nur einen Operating Case) ist die Angabe der jährlichen Betriebsstunden ausreichend. Ein allfälliger Stillstand der Anlage in der Nacht oder an Wochenenden muss nicht erfasst werden.

Öffnen Sie das Register [OC Schedule 1](#).

☞ Doppelklick auf [OC Schedule 1](#) (im Project Explorer unter BaseCase ☞ Operating Cases Scheduling)

Tragen Sie die jährlichen Betriebsstunden des in [Step 3](#) definierten Prozesses gemäss den Betriebszeiten ein.

☞ In Spalte [Timebase](#) "Cont. Year" auswählen

☞ Zelle in Spalte [Duration](#) anklicken

☞ Wert anpassen

Nun zeigt uns die Registerkarte OC Schedule 1 an, dass unser Prozess in Kalenderwoche 1, Montagmorgens um 00:00 Uhr beginnt und ab diesem Zeitpunkt 7'000 h ohne Unterbruch in Betrieb ist.

Hinweis: Die Spalte [Production Campaign Start](#) gibt an, zu welchem Zeitpunkt der Prozess relativ zum Jahresbeginn startet. In Spalte [Production Campaign End](#) ist ersichtlich, zu welchem Zeitpunkt der Prozess endet. Die [Gross Operation Time](#) beschreibt die Betriebsdauer des Prozesses inklusive Unterbrechungen (Differenz zwischen Production Campaign Start und Production Campaign End). Die [Net Operation Time](#) zeigt, wie viele Stunden der Prozess effektiv in Betrieb ist (berücksichtigt z. B. Unterbrechungen über Nacht oder an Wochenenden). Die Net Operation Time entspricht den Gesamtbetriebsstunden pro Jahr und wird für die Berechnung der Energiekosten benötigt.

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

Process	Timebase	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su	Daytime Start	CW Start	# Weeks	Duration	Prod. Campaign Start	Prod. Campaign End	Gross Op. Time	Net Op. Time
									hh:mm	week		h	h	h	h/y	h/y
Chemical Process	Cont. Year	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	00:00	1	-	7'000.00	0.00	7'000.00	7'000.00	7'000.00

Abbildung 9: Operating Cases Scheduling



Step 5: Set Economic Data

Die Angabe von wirtschaftlichen Kenngrössen ist für die Berechnung von Investitions- und Betriebskosten erforderlich.

In [PinCH](#) werden die Kosten für die Wärmeübertrager wie im Abschnitt "Investitionskosten" auf Seite 4 erläutert berechnet. Vier Sets von Kostenparametern können definiert werden:


- für HEX zwischen Prozess-Strömen
- für HEX zwischen HU und Prozess-Strömen
- für HEX zwischen CU und Prozess-Strömen
- für HEX zwischen Speicher-Zwischenkreisläufen und Prozess-Strömen

Öffnen Sie die Registerkarte [Economic Data](#).

 Doppelklick auf [Economic Data](#) (im Project Explorer unter BaseCase  Economic Data)

Ändern Sie die wirtschaftlichen Kenngrößen für die [Process Heat Exchanger Costs](#) gemäss den vorgegebenen Daten.

 Zellen anklicken

 Werte anpassen

Da die Wärmeübertrager zum Heizen mit Heizedampf (HU) und Kühlen mit Kühlwasser (CU) bereits vorhanden sind, setzen Sie den C_b -Wert für [Hot und Cold Utility Heat Exchanger Costs](#) zu Null. Die bestehenden Wärmeübertrager sollen weiterhin genutzt werden. Die [Amortisationszeit / Pay off period](#) und den [Zinssatz / Interest Rate](#) definieren Sie gemäss den Vorgaben.

Hinweis: Die Kosten für HEX zwischen Speicher-Zwischenkreisläufen und Prozess-Strömen (ISSP-HEX), Speichertanks (Storage Tank Costs) und Speichermedien (Storage Media Costs) werden in diesem Fallbeispiel nicht benötigt.

Zusatzinformation: Kosten für Elektrizität, unabhängige Fixkosten sowie Personal- und Wartungskosten können nach Bedarf eingetragen werden. Vor allem die Elektrizitätskosten sind bei der späteren Integration einer allfälligen Wärmepumpe von grosser Wichtigkeit. Zur Bestimmung des optimalen ΔT_{min} sind diese jedoch nicht relevant, da sie einen vom ΔT_{min} unabhängigen (konstanten) Betrag darstellen. Unter "Electric Power" kann auch ein konstanter elektrischer Leistungsbedarf (Base Load, z.B. für Pumpen, Ventilatoren, Rührwerke) vorgegeben werden, welcher bei den Betriebskosten berücksichtigt wird.

Ihr fertiger Datensatz sollte nun folgende Werte enthalten:

5 Economic Data The economic Data data is used throughout the software PinCH for calculating the main costs associated with an heat exchanger network

Heat Exchanger Costs ⓘ

$$C = C_0 + C_b (A/A_b)^m$$

A = Heat Exchanger Area in m²

Type	Fixed Cost C ₀ EUR	Base Cost C _b EUR	Base Area A _b m ²	Exponent m
Process Heat Exchanger Costs	0	110'000.0	100	0.71
Hot Utility Heat Exchanger Costs	0	0.0	100	0.71
Cold Utility Heat Exchanger Costs	0	0.0	100	0.71
ISSP Heat Exchanger Costs	0	110'000.0	100	0.71

Storage: Tank Costs ⓘ

$$C = C_0 + C_b (V/V_b)^m$$

V = Tank Volume in m³

Storage	Fixed Cost C ₀ EUR	Base Cost C _b EUR	Base Volume V _b m ³	Exponent m	Storage Type
FTVM	0	120'000.0	100	0.71	FTVM
Stratified	0	120'000.0	100	0.71	Stratified

Storage: Media Costs and Media Properties

$$C = C_b * m_{sm}$$

m_{sm} = Mass of Storage Media in kg

Media	Base Cost C _b EUR/kg	Density kg/m ³	α W/(m ² K)	c _p kJ/(kg K)
Water	0.0010	1000	2000	4.18789
Heat Transfer Oil	5.0000	800	1000	2.00000

Amortisation Parameters ⓘ

Pay Off Period y Independent EUR

Interest Rate % Personnel %/y Investment Costs

Annuity 0.374 1/y Maintenance %/y Investment Costs

Electricity ⓘ

Note: Utility Costs are set on Utility Stream Table Electricity Cost EUR/MWh Electric Power kW

Abbildung 10: Economic Data

Ihr Project Explorer hat nun folgenden Aufbau:

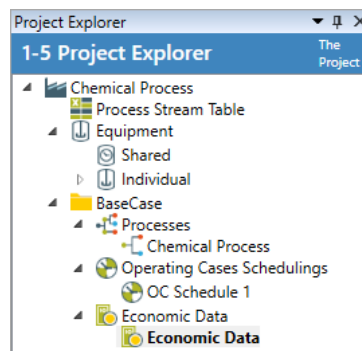


Abbildung 11: Project Explorer

Step 6: Prepare Targeting Calculations

Nach der Bearbeitung der [Steps 1-5](#) sind alle für die Pinch-Analyse benötigten Daten im Project Explorer abgelegt. Sie können nun die Energie- und Kostenziele berechnen, indem Sie im [Target Explorer](#) eine sogenannte [Target Group](#) erstellen.

Zusatzinformation: Eine Target Group besteht aus einer Kombination von (einem oder mehreren) Prozessen, Utilities, einem Operating Case Schedule und einem Set aus wirtschaftlichen Kenngrößen.

Durch das Analysieren verschiedener Szenarien, d. h. verschiedene Kombinationen aus den in Step 1-5 konfigurierten Daten, können Sie deren Einfluss auf die resultierenden Energie- und Kostenziele untersuchen. Wenn in PinCH nur ein Prozess sowie nur eine HU und eine CU vorhanden sind, werden der Prozess und die beiden Utilities automatisch zugewiesen.

Zum Erstellen einer Target Group gehen Sie wie folgt vor:

- ☞ Rechtsklick auf BaseCase im Target Explorer
- ☞ Add Target Group wählen

Sofern nicht bereits automatisch geschehen, weisen Sie der Target Group den in Step 3 definierten Prozess "Chemical Process" zu:

- ☞ Doppelklick auf Target Group 1
- ☞ Rechtsklick auf Processes
- ☞ Assign Process ☞ "Chemical Process" wählen

Sofern nicht bereits automatisch geschehen, weisen Sie der Target Group mindestens eine HU und eine CU zu:

- ☞ Rechtsklick auf Utilities
- ☞ Assign Utility Definition ☞ Die Ströme Hot Utility und Cold Utility wählen

Hinweis: Um der "Target Group 1 (Economic Data, OC Schedule 1)" einen anderen Operating Case Schedule oder ein anderes Set aus wirtschaftlichen Kenngrößen zuzuweisen, gehen Sie wie folgt vor:

- ☞ Rechtsklick auf Target Group
- ☞ Reassign Operating Cases Schedule / Reassign Economic Data wählen

Die Ausführung des Befehls ist erst möglich, wenn im Project Explorer ein zweiter Operating Case Schedule bzw. ein zweites Set aus Economic Data erstellt wurde.

Ihr Target Explorer hat nun folgenden Aufbau:

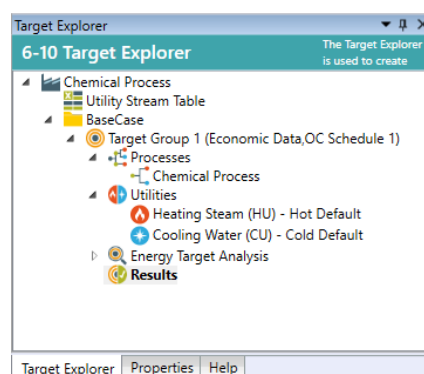


Abbildung 12: Target Explorer



Step 7: Analyze Energy Targets

Nach der Bearbeitung von [Step 6](#) sind alle Vorbereitungen für die Berechnung der Energie- und Kostenziele abgeschlossen. Bevor wir die Ergebnisse in [Step 8](#) berechnen, können wir mit dem Tool [Energy Target Analysis](#) umfangreiche Analysen zu WRG-Potenzialen für das betrachtete Szenario (also unsere Target Group) durchführen.

Zusatzinformation: Das Energy Target Analysis Tool erlaubt u. a. die Untersuchung des Einflusses einzelner Prozesse auf das gesamte WRG-Potenzial von mehreren, zeitlich teilweise parallel ablaufenden Prozessen. Darüber hinaus kann für Batch-Prozesse das zeitgleiche (direkte) und das zeitverschobene (indirekte) WRG-Potenzial analysiert werden. Die Energy Target Analysis Tool hat aber noch viel mehr zu bieten. Es ist besonders hilfreich für komplexere Systeme, bei denen mehrere Operating Cases zu optimieren sind.

Für unser Fallbeispiel, ein kontinuierlicher Prozess mit nur einem Operating Case, ist eine detaillierte Analyse in [Step 7](#) nicht nötig.






Step 8: Calculate Energy & Cost Targets

Ein Schlüsselaspekt der Pinch-Analyse ist die Berechnung von Energie- und Kostenzielen vor der (oft subjektiv beeinflussten) Untersuchung einzelner WRG-Massnahmen.

Hinweis: Der Leitsatz der Pinch-Analyse lautet [Targets before Design!](#)

Das in [Step 8](#) durchgeführte [Targeting](#) berechnet den optimalen Einsatz an Utilities, das optimale WRG-Potenzial, die optimal zu installierende Wärmeübertragungsfläche, die benötigte Anzahl Wärmeübertrager und die damit verbundenen minimalen jährlichen Gesamtkosten.

Starten Sie das Targeting:

-  Rechtsklick auf [Results](#)
-  [Calculate Target Result with...](#)  [Separate Design](#) wählen

Die sich nun öffnende Registerkarte [Sep. Design 1_1](#), siehe Abbildung 13, umfasst folgende Fenster:

- [Time Charts](#): Das Overall Gantt Chart zeigt den zeitlichen Verlauf der berücksichtigten Prozesse über ein Jahr. Das OC Gantt Chart zeigt für einen bestimmten Operating Case den zeitlichen Verlauf der Prozesse auf Wochenbasis.
- [OC Charts](#): Mit den verschiedenen OC Charts kann das Potenzial zur energetischen und wirtschaftlichen Optimierung der jeweiligen Operating Cases untersucht werden.
- [OC Data](#): Hier sind die wichtigsten Resultate in einer Tabelle zusammengefasst.

Im Folgenden wollen wir uns auf die für unser Fallbeispiel wesentlichen Diagramme und Werte konzentrieren.

Da wir *einen* kontinuierlichen Prozess und damit nur *einen* Operating Case betrachten, sind die Time Charts nicht von grosser Bedeutung. Sie können diese zur besseren Übersicht ausblenden.

-  Entfernen der Häkchen in den Kästchen [Processes](#) und [OC's](#) durch Anklicken

Weiter kann die Grösse eines Fensters durch Verschieben des Fensterrands verändert werden. So können Sie z. B. das Fenster OC Charts vergrössern und dabei das Fenster Time Charts verkleinern.

- Fahren Sie mit der Maus auf den oberen Rand des Fensters OC Charts (Doppelpfeil erscheint)
- Ziehen Sie den Fensterrand nach oben

Im Fenster OC Charts wollen wir die Diagramme **CC** (Composite Curves) und **Cost** analysieren (siehe Abbildung 13).

- Aktivieren Sie das Kontrollkästchen **Costs** und deaktivieren Sie **GCC**

Die Hot und Cold Composite Curve werden im Diagramm **Composite Curves** ($T, \Delta\dot{H}$ - Diagramm) dargestellt. Innerhalb des Bereichs, indem sich die beiden Kurven überlappen, ist prozessinterne WRG möglich. Im [BFE-Handbuch](#) ist der Aufbau und die Interpretation der **Composite Curves** ausführlich behandelt. Den Heiz- und Kühlbedarf (HU/CU) können Sie grafisch darstellen:

- Rechtsklick in das Diagramm Composite Curves
- Display Utilities** wählen

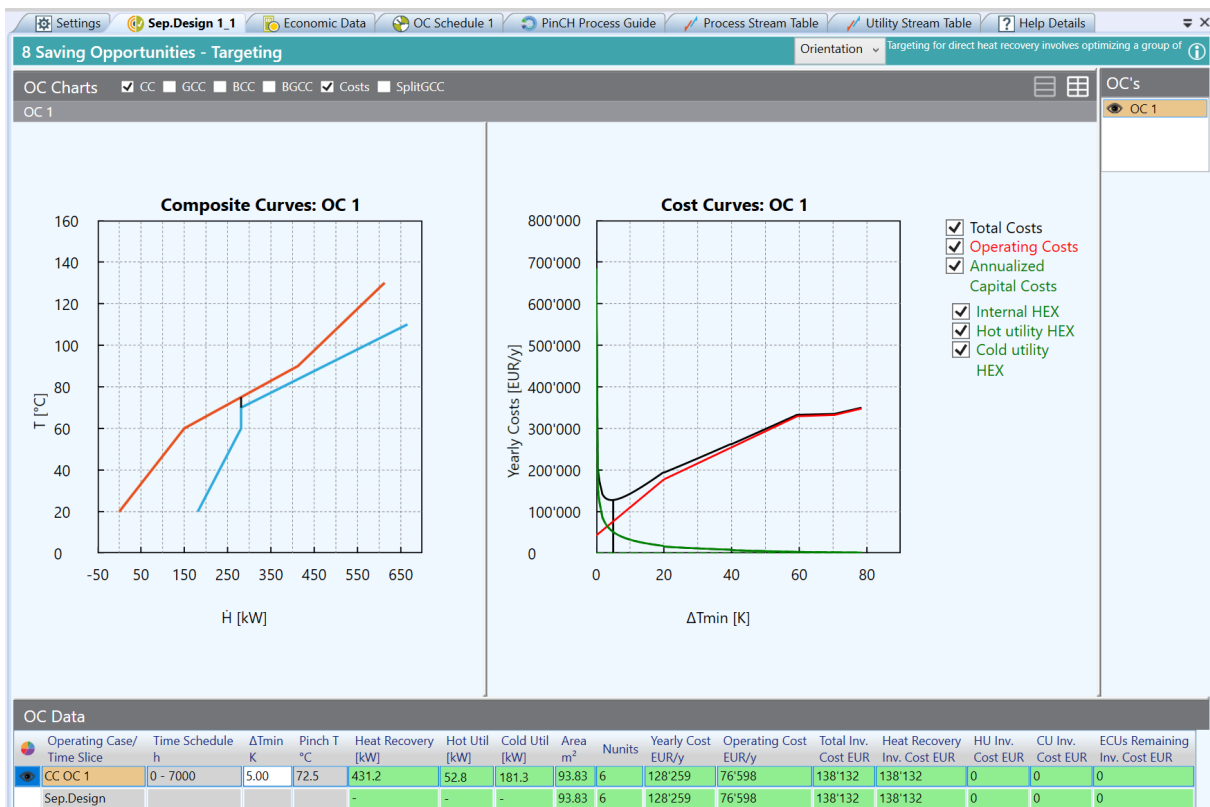


Abbildung 13: Composite Curves (rot: Hot CC, blau: Cold CC), Cost Curve und OC Data

Die Stelle, an welcher der vertikale Abstand der Composite Curves minimal ist, wird als **Pinch-Punkt** bezeichnet. Der Pinch-Punkt ist durch die minimale Temperaturdifferenz charakterisiert. Letztere können Sie durch horizontales Verschieben der Cold Composite Curve mit der Maus variieren. **PinCH** berechnet die Energie- und Kostenziele automatisch neu. Ob Sie die Kurve jedoch nach links oder rechts verschieben – die jährlichen Gesamtkosten werden in jedem Fall steigen (wie Sie der schwarzen Cost Curve und der Tabelle OC Data entnehmen können). Beachten Sie, dass die Software Ihnen bereits die optimale minimale Temperaturdifferenz $\Delta T_{min,opt}$ bestimmt hat.

Zusatzinformation: Das Optimieren der minimalen Temperaturdifferenz ΔT_{min} nennen wir Supertargeting. Die jährlichen Gesamtkosten sind eine Funktion der minimalen Temperaturdifferenz. Diese Funktion wird grafisch im Diagramm Cost Curve dargestellt. Mit Zunahme von ΔT_{min} steigen die Betriebskosten (Operating Costs, rote Kurve), da weniger WRG realisiert werden kann und der Bedarf an HU und CU steigt. Gleichzeitig sinken aber die Investitionskosten (Annualized Capital Costs, grüne Kurve), da die benötigte Fläche der Wärmeübertrager kleiner wird. PinCH berechnet automatisch die Gesamtkosten (schwarze Kurve), aus welcher schliesslich die optimale minimale Temperaturdifferenz $\Delta T_{min,opt}$ folgt.

Die Energie- und Kostenziele können der Tabelle OC Data entnommen werden. Die optimale minimale Temperaturdifferenz beträgt 4.57 K. Runden Sie diesen Wert sinnvollerweise auf $\Delta T_{min,opt} = 5$ K. Dabei ergibt sich ein Zielwert für die umzusetzende **WRG / Heat Recovery (HR)** von 431 kW. Der optimale Einsatz an HU beträgt 53 kW und 181 kW für die CU. Es ergeben sich minimale jährliche Gesamtkosten (annualisierte Investitions- und Energiekosten) von gerundet 128'000 €/a.

Schauen wir uns abschliessend noch die **GCC** (Grand Composite Curve) an:

Aktivieren Sie das Kontrollkästchen **GCC** und deaktivieren Sie **CC** und **Costs**

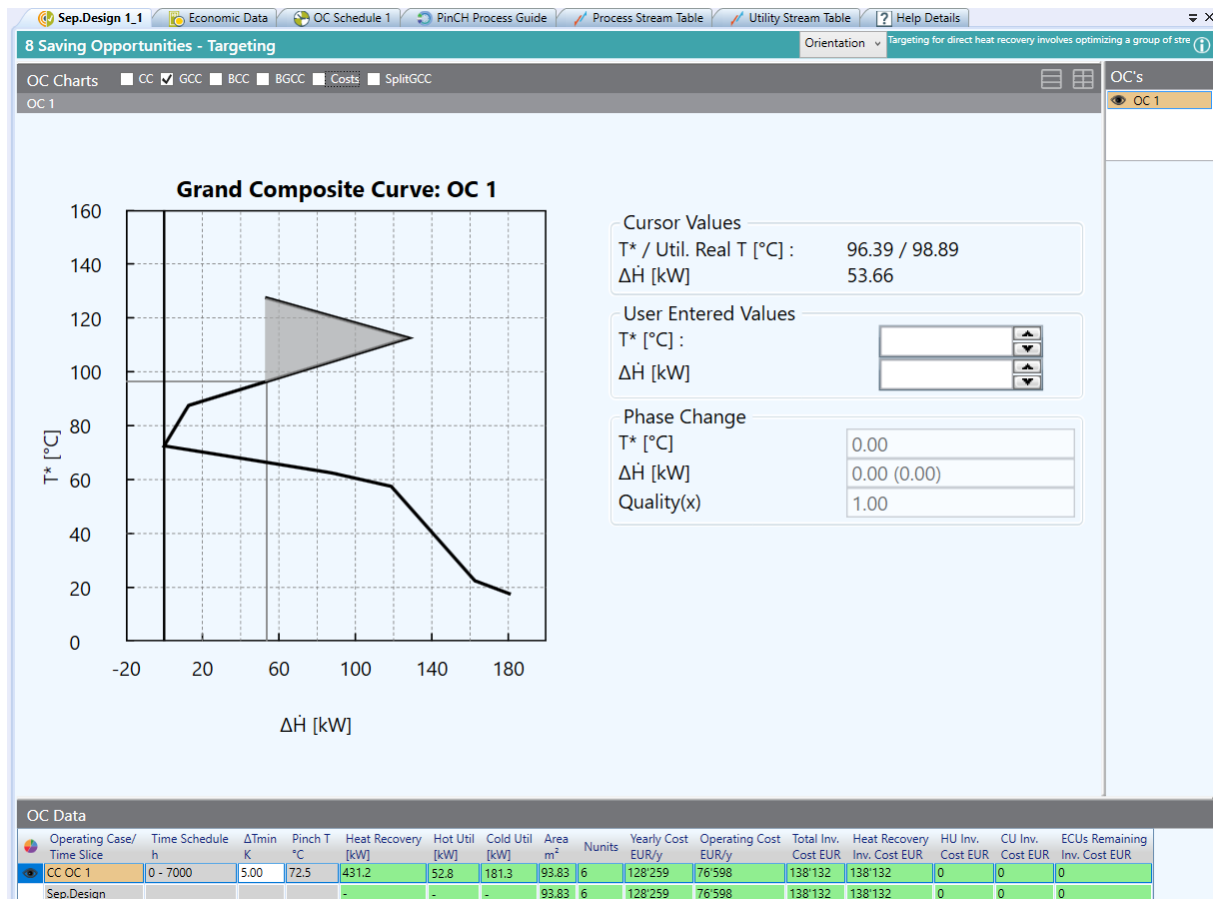


Abbildung 14: Grand Composite Curve

Oberhalb des Pinch-Punktes existiert in unserem Fallbeispiel eine sogenannte **Pocket** (siehe Abbildung 14). Im Temperaturbereich der Pocket wird keine externe Heizung und Kühlung benötigt, d.h. die maximal notwendige Temperatur der HU kann auf $T = 99$ °C gesenkt werden.

Hinweis: Aufgrund ihrer Eigenschaften ist die GCC ein hervorragendes Instrument zur Untersuchung weiterer Optimierungspotenziale, z.B. hinsichtlich der Energieversorgung (siehe [BFE-Handbuch](#)).

Sie können den Wärmeüberschuss unterhalb des Pinch-Punktes bzw. das Wärmedefizit oberhalb des Pinch-Punktes anzeigen lassen. Dazu tragen Sie unter User Entered Values in die Spalte T^* (verschobene Temperatur) die Sie interessierende Temperatur ein. Dabei ist anzumerken, dass T^* wie folgt von der realen Temperatur T abhängt:

- über dem Pinch-Punkt: $T^* = T - \Delta T_{min}/2$
- unter dem Pinch-Punkt: $T^* = T + \Delta T_{min}/2$

In unserem Fallbeispiel lässt sich aus der GCC eine weitere Schlussfolgerung ziehen: Unterhalb des Pinch-Punktes, auf einem interessanten Temperaturbereich von $20 - 72.5^\circ\text{C}$, verfügt der Prozess über rund 180 kW Wärmeüberschuss, welcher nicht zur WRG genutzt werden kann (so genannte Abwärme). Hier kann es interessant sein, die Systemgrenze für die Pinch-Analyse zu erweitern und den Produktionsbetrieb auf weitere, noch nicht erfasste Wärmesenken zu untersuchen (Total Site Analysis).



Step 9: Integrate Energy Conversion Units (ECUs)

In vielen industriellen Prozessen ist trotz prozessinterner WRG der Heiz- und Kühlbedarf gross. In diesen Fällen lohnt es sich, die Integration einer ECU zu überprüfen. Eine ECU kann einerseits eine Wärmekraftmaschine sein, deren Abwärme im Prozess genutzt wird und somit HU ersetzt. Die mechanische Energie der Wärmekraftmaschine wird in den meisten Fällen in einem Generator in elektrische Energie umgewandelt (z. B. Blockheizkraftwerk, BHKW). Andererseits kann eine ECU auch eine Wärmepumpe sein, die mittels elektrischer Energie Wärme auf ein höheres Temperaturniveau anhebt. Die höherwertige Wärme wird wiederum verwendet, um HU zu ersetzen.

Die Pinch-Analyse ist ein hervorragendes Instrument, um die Integration einer ECU zu analysieren. Um eine Optimierung (und damit Kostenreduzierung) der Energieversorgung vorzunehmen, können in PinCH die korrekte Integration einer Wärmepumpe, eines mechanischen oder thermischen Brüdenverdichters, einer ORC-Anlage sowie eines BHKW durchgeführt werden.

Die Integration einer Wärmepumpe wäre für diesen Prozess prinzipiell denkbar, wir wollen aber in diesem Einführungstutorial darauf verzichten.



Step 10: Design Heat Exchanger Network (HEN)

Gratulation! Sie haben das Targeting als Grundlage einer energetischen und wirtschaftlichen Optimierung des Prozesses erfolgreich abgeschlossen. Nun stellt sich eine weitere wichtige Frage: *Wie sollen die Energie- und Kostenziele in der Praxis realisiert werden?* Mit Hilfe von PinCH können Sie ein HEN aufbauen. Das HEN ist weniger komplex als ein typisches Verfahrensbild. Es zeigt auf, welche Prozess-Ströme in welcher Reihenfolge mit Wärmeübertragern verbunden werden sollen. Basierend auf dieser Grundlage kann ein optimiertes Anlagendesign erarbeitet werden.

In diesem Beispiel wollen wir ein sogenanntes MER HEN erstellen. MER steht dabei für Maximum Energy Recovery oder auch Minimum Energy Requirement.

 Rechtsklick auf [Sep. Design 1_1](#) im Target Explorer

 Add HEN...  Add MER HEN wählen

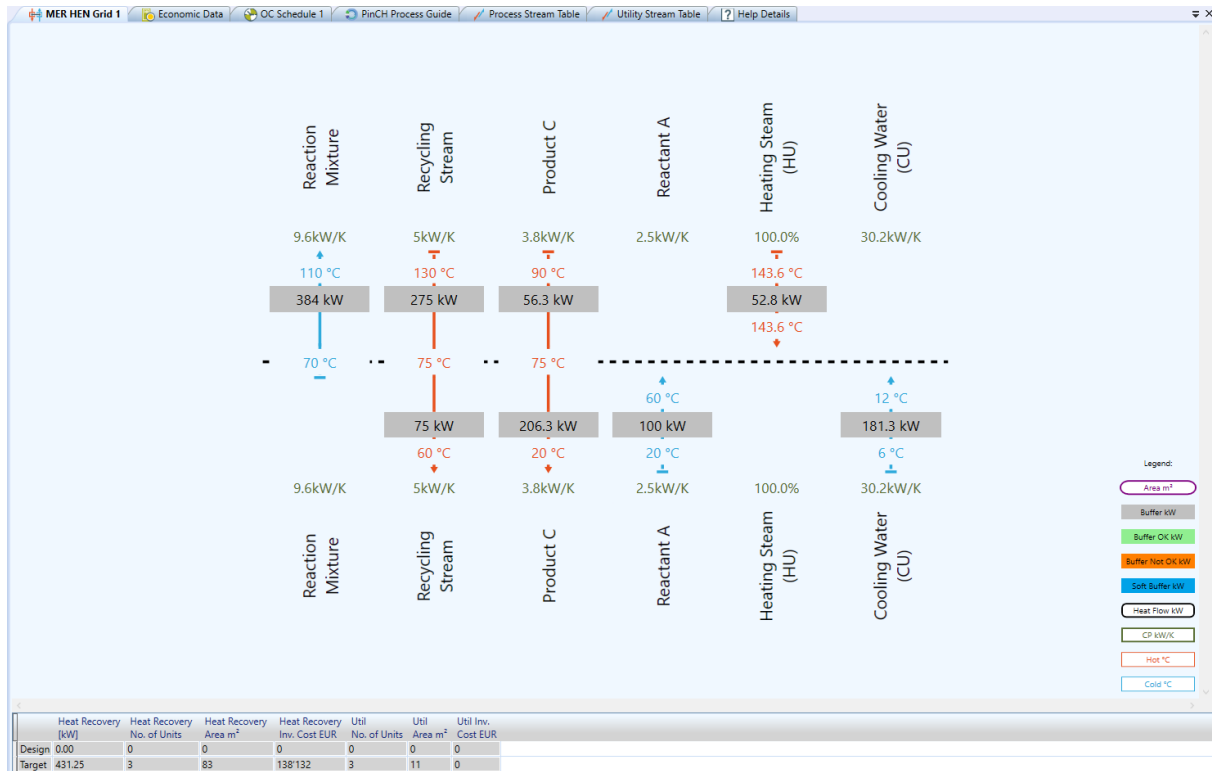




Abbildung 15: Leeres MER HEN Grid

Es erscheint nun die neue Registerkarte **MER HEN Grid 1**. Beim Design eines HEN betrachtet man die einzelnen Prozess-Ströme. Die Pfeilrichtungen und die Farben der im MER HEN dargestellten Ströme geben an, ob es sich um aufzuwärmende (Cold Streams, blau) oder abzukühlende (Hot Streams, rot) Ströme handelt. Die Werte der Wärmekapazitätsströme (CP) sind unterhalb bzw. oberhalb der Namen des zugehörigen Stroms vermerkt. Sie können die Ströme im HEN mit Drag & Drop frei anordnen.

Zusatzinformation: Mit einem MER HEN ist eine Verletzung der drei Pinch-Hauptregeln nicht möglich (keine CU oberhalb des Pinch-Punktes, keine HU unterhalb des Pinch-Punktes sowie kein Wärmetransfer über den Pinch-Punkt). Deshalb ist das MER HEN auf Höhe der Pinch-Temperatur zweigeteilt: In ein Teilsystem oberhalb sowie ein Teilsystem unterhalb des Pinch-Punktes. Eine Verknüpfung der Ströme über die gestrichelte Pinch-Linie hinweg und somit Wärmetransfer über den Pinch-Punkt ist nicht möglich. Zudem ist HU nur oberhalb, CU nur unterhalb des Pinch-Punktes verfügbar. Das Design gewährleistet, dass beim Erstellen des MER HEN die drei Pinch-Hauptregeln nicht verletzt werden (siehe [BFE-Handbuch](#)).

Betrachten wir zunächst das Teilsystem unterhalb des Pinch-Punktes. Gemäss den Design-Regeln zur Erstellung eines MER HEN (vgl. [BFE-Handbuch](#)) beginnen wir mit dem grössten Wärmekapazitätsstrom in Richtung des Pinch-Punktes. In unserem Beispiel ist das der Strom Reactant A ($CP = 2.5 \text{ kW/K}$), dessen Heizanforderung wir in einem möglichst grossen HEX vollständig erfüllen wollen. Hierzu eignet sich der Strom Product C ($CP = 3.8 \text{ kW/K}$, exakt sind es $CP = 3.75 \text{ kW/K}$, die angezeigten Werte sind gerundet), welcher über ein genügend grosses Wärmeangebot verfügt. Um einen HEX zu erzeugen, benötigen wir zwei sogenannte Heater/Coolers.

- ☞ Wenn Sie mit der Maus über das HEN fahren, wird eine horizontale Linie eingeblendet. Durch Klicken auf diese Linie wird ein Abstand (Zeile) in das HEN eingefügt. (vgl. Abbildung 15)




-  Zur Erzeugung eines Heater/Coolers blaue Linie des Stroms Reactant A anklicken
-  Zur Erzeugung eines Heater/Coolers rote Linie des Stroms Product C anklicken

Die Heater/Cooler erscheinen als abgerundete Rechtecke. In der Mitte der Rechtecke wird die Wärmeübertragungsleistung in kW (links) sowie die benötigte HEX-Fläche in m² (rechts) angezeigt.



Abbildung 16: HEX mit zwei Heater/Cooler

Verbinden Sie nun die beiden Heater/Cooler:

-  Auf den linken bzw. rechten Rand eines Heater/Coolers klicken
-  Mit gedrückter Maustaste eine Verbindung zum anderen Heater/Cooler ziehen
-  Durch Doppelklick auf einen der beiden Heater/Coolers wird die maximal mögliche Leistung des HEX berechnet.

Mit diesem Vorgehen wenden Sie die [Tick Off Rule](#) an (siehe [BFE-Handbuch](#)): Die drei Pinch Hauptregeln werden eingehalten und das ΔT_{min} wird nicht unterschritten. Die Wärmeübertragungsleistung können Sie auch manuell vorgeben, indem Sie die gewünschte Leistung in das entsprechende Feld des linken Heater/Coolers eintragen und mit Enter bestätigen.

Hinweis: Die in den rechteckigen Feldern ("Buffer") am Ende jedes Stroms aufgeführten Leistungen (in kW) geben an, wie viel Wärme einem kalten Strom zugeführt bzw. von einem heißen Strom abgeführt werden muss, damit dieser die geforderte Endtemperatur erreicht. Existiert ein Strom oberhalb und unterhalb des Pinch-Punktes, so gilt es in einem MER HEN, seine Anforderungen oberhalb und unterhalb des Pinch-Punktes separat zu erfüllen.

Zur Fertigstellung des MER HEN im Teilsystem unterhalb des Pinch-Punktes verknüpfen wir die beiden Hot Streams mit der CU.

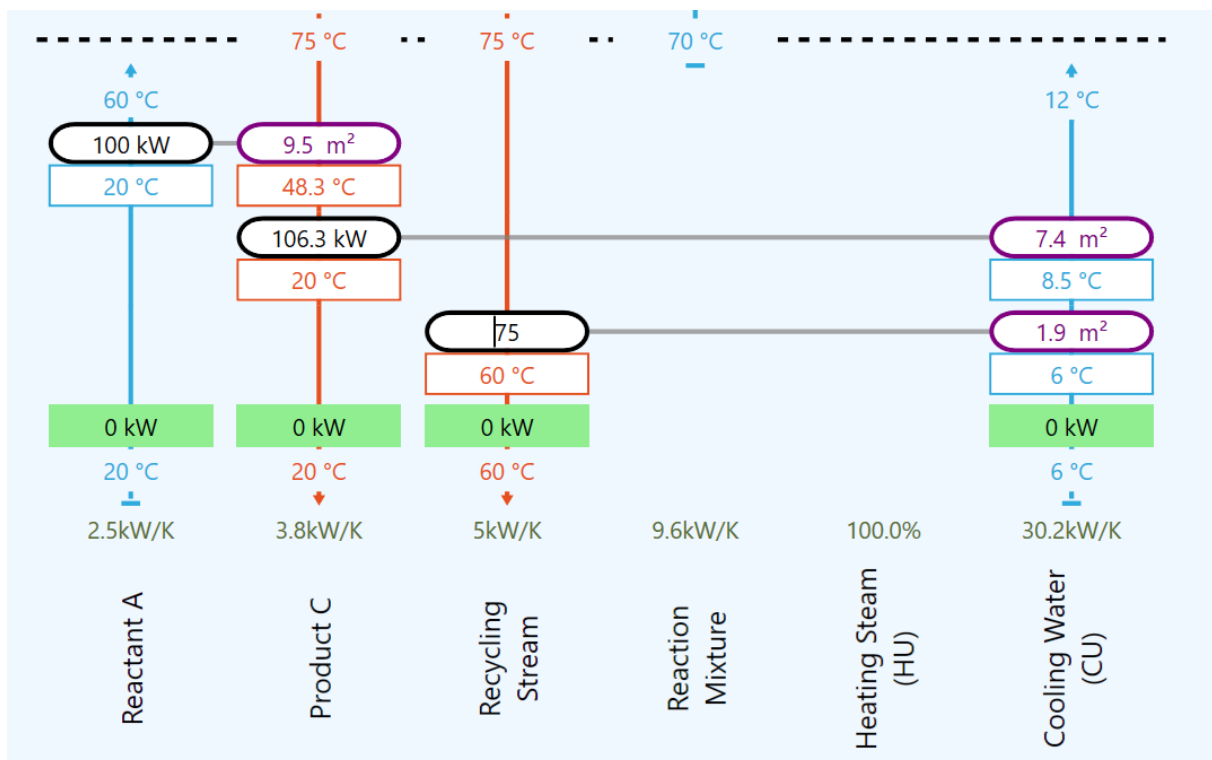


Abbildung 17: MER HEN im Teilsystem unterhalb des Pinch-Punktes

Zusatzinformation: Sie können übrigens einen HEX jederzeit wieder entfernen:

- ☞ Rechtsklick auf einen der beiden Heater/Cooler
- ☞ Remove Heat Exchanger Connection wählen

Entfernen eines Heater/Coolers:

- ☞ Rechtsklick auf den Heater/Cooler
- ☞ Remove Heater/Cooler wählen

Wenden wir uns dem Teilsystem oberhalb des Pinch-Punktes zu: Versuchen Sie, die erforderlichen HEX selbstständig zu erstellen.


Wie Sie sicher bemerkt haben, ist eine Verbindung der Ströme hier nicht möglich. Das [Number Criteria \(N-Regel\)](#) wird verletzt (siehe [BFE-Handbuch](#)). Der aufzuwärmende Strom Reaction Mixture ($CP = 9.6 \text{ kW/K}$) muss gesplittet werden.

- ☞ Rechtsklick auf den Strom Reaction Mixture
- ☞ Split Stream wählen

Starten wir wieder mit dem grössten Wärmekapazitätsstrom in Richtung des Pinch-Punktes. Verbinden Sie den Strom Recycling Stream ($CP = 5 \text{ kW/K}$) mit einem der Teilströme des Stroms Reaction Mixture

($CP = 4.8 \text{ kW/K}$).


Wie Sie feststellen können, ist diese Verbindung nicht möglich. Die **CP-Regel** wird verletzt. Um diese erfüllen zu können, muss der Wärmekapazitätsstrom Reaction Mixture ($CP = 4.8 \text{ kW/K}$) grösser oder gleich als der Wärmekapazitätsstrom Recycling Stream ($CP = 5 \text{ kW/K}$) sein (vgl. [BFE-Handbuch](#)). Ändern Sie dazu den Wärmekapazitätsstrom eines Teilstroms von Reaction Mixture in der entsprechenden (umrandeten) Zelle unterhalb der Beschriftung des Stroms.

 Zelle anklicken

 Geben Sie einen Wärmekapazitätsstrom von $CP = 5.85 \text{ kW/K}$ ein.


Die Verbindung zwischen den Strömen ist nun möglich. Um eine isotherme Mischung zu gewährleisten, darf die Tick Off Rule aber erst angewendet werden, wenn in beiden Teilströmen die Heater/Cooler eingefügt und verbunden worden sind.


Um den zweiten Teilstrom Reaction Mixture ($CP = 3.8 \text{ kW/K}$) aufzuheizen, verbinden Sie diesen mit dem Strom Product C ($CP = 3.8 \text{ kW/K}$). Bevor wir nun die restlichen HEX setzen, ist es sinnvoll, die gesplitteten Ströme der Reaction Mixture wieder zu vereinen:

 Rechtsklick auf einen Teilstrom der Reaction Mixture (oberhalb des Heater/Coolers)

 Merge Branches wählen

Um die Regel, dass zwei Ströme beim Mischen die gleiche Temperatur aufweisen sollten (Vermeidung von Exergieverlust, siehe [BFE-Handbuch](#)), zu berücksichtigen, ist generell zuerst der HEX mit der kleineren maximalen Leistung anzuwählen. Gehen Sie wie folgt vor:

 Doppelklick auf den Heater/Cooler im Ast des Stroms Reaction Mixture, welcher mit dem Strom Product C verbunden ist (Tick Off Rule)

 Wenden Sie analog die Tick Off Rule auf den Heater/Cooler im Ast des Stroms Reaction Mixture an, welcher mit dem Strom Recycling Stream verbunden ist.

Die Temperaturen nach den beiden Wärmeübertragern sind identisch und es findet eine isotherme Mischung statt.

Zur Vervollständigung des MER HEN verknüpfen Sie den wieder vereinten Strom Reaction Mixture ein weiteres Mal mit dem Strom Recycling Stream und zum Schluss noch mit der HU.

Die Tabelle im unteren Bereich der Abbildung 18 zeigt in der Zeile **Target** die in **Step 8** berechneten Energie- und Kostenziele sowie in der Zeile **Design** die resultierenden Daten gemäss dem aktuell erstellten MER HEN. Es ist ersichtlich, dass der Zielwert für die WRG exakt erreicht ist. Auch die Zielwerte für die HEX-Fläche und die Investitionskosten wurden nahezu erreicht.

Hinweis: Dass wir in diesem Fallbeispiel die Energie- und Kostenziele vollständig erreichen, liegt sicherlich auch an der Einfachheit des gewählten Prozesses. In der Regel gilt es, zwischen der Komplexität des HEN und dem Erreichungsgrad der Energie- und Kostenziele einen Kompromiss zu finden. Hierfür kann in PinCH ein sogenanntes relaxed HEN erstellt werden, für das die drei Pinch-Hauptregeln nicht eingehalten werden müssen. Die Verletzung der Hauptregeln reduziert zwangsläufig das WRG-Potenzial. Es liegt an Ihnen, diese Freiheiten mit Bedacht auszunutzen.

Das fertige MER-HEN sollte nun folgendermassen aussehen:

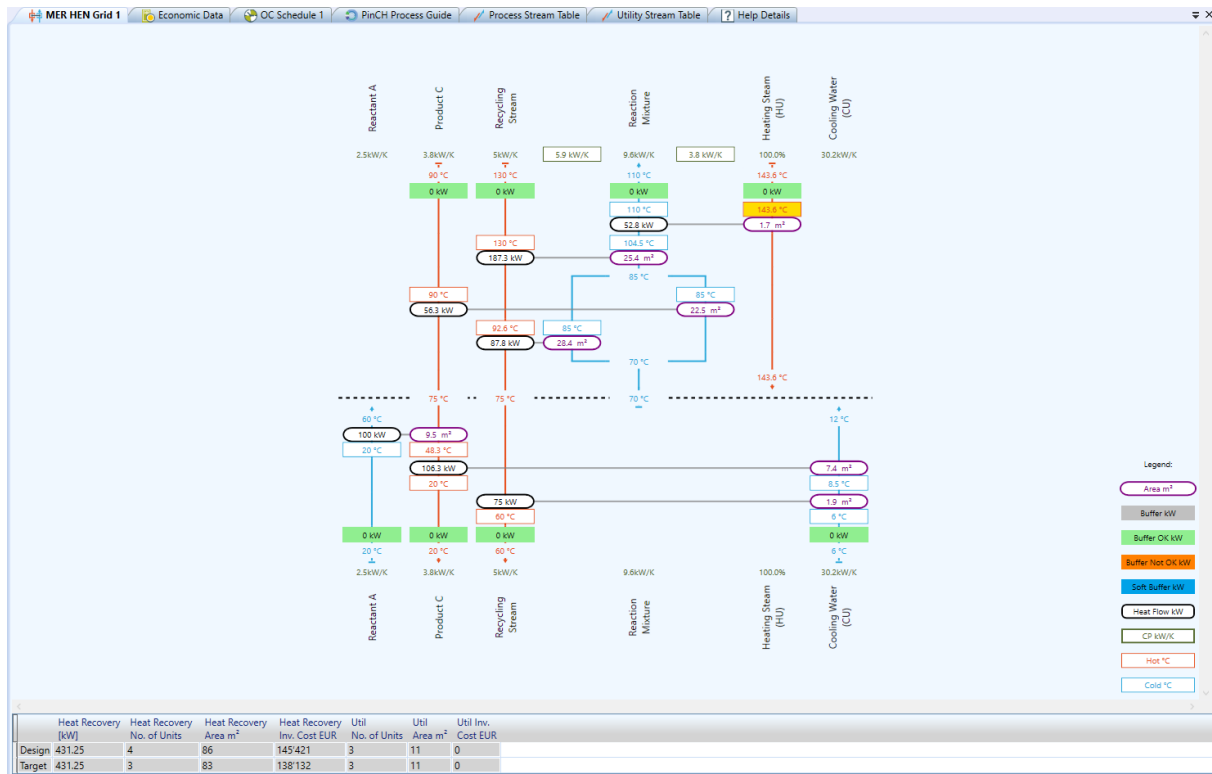


Abbildung 18: MER HEN

Bitte beachten Sie: Dieses MER HEN Design ist nur ein Beispiel. Für jeden Prozess gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Ströme miteinander zu verbinden.

Zusatzinformation: Driving Force Plot / HEX Details

Wenn die Design Heat Recovery Investment Costs stark von den Target Results abweichen, ist dies darauf zurückzuführen, dass keine vertikale Wärmeübertragung stattfindet (siehe [BFE-Handbuch](#)). Um dies zu überprüfen, betrachten wir die Driving Force Plots der einzelnen HEX. Durch einen Doppelklick auf die Verbindungslinie zwischen den Heater/Coolers öffnet sich eine neue Registerkarte, in welcher alle HEX mit allen Details, welche für die Auslegung benötigt werden, aufgeführt sind. Unterhalb der Tabelle ist auf der linken Seite ein $T, \Delta\dot{H}$ -Diagramm dargestellt, welches die beiden Ströme zeigt, die durch den jeweiligen HEX gekoppelt sind. Auf der rechten Seite ist die Driving Force / Temperaturgefälle des HEX abgebildet.

Der Driving Force Plot zeigt die Temperaturdifferenz in einem HEX in Abhängigkeit der Temperaturänderung des Cold Streams an. Dabei beschreibt die blaue Kurve das Target und die schwarze die reale Driving Force.

Wenn die beiden Kurven nicht übereinstimmen, nennt man dies einen "criss-cross HEX". Dabei wird zu viel oder zu wenig der zur Verfügung stehenden Driving Force genutzt, was zu einer Reduktion oder Erhöhung der benötigten HEX-Fläche führt.

Die Optimierung des HEN mit Hilfe des Driving Force Plot erreicht eine minimale HEX-Fläche.

Jedoch steht dies im Widerspruch mit der Tick Off Rule (Doppelclick auf die Leistungsangabe eines Heater/Coolers), welche eine Maximierung der Übertragungsleistung zum Ziel hat. Es liegt in Ihrem Ermessen, einen Kompromiss zu finden.

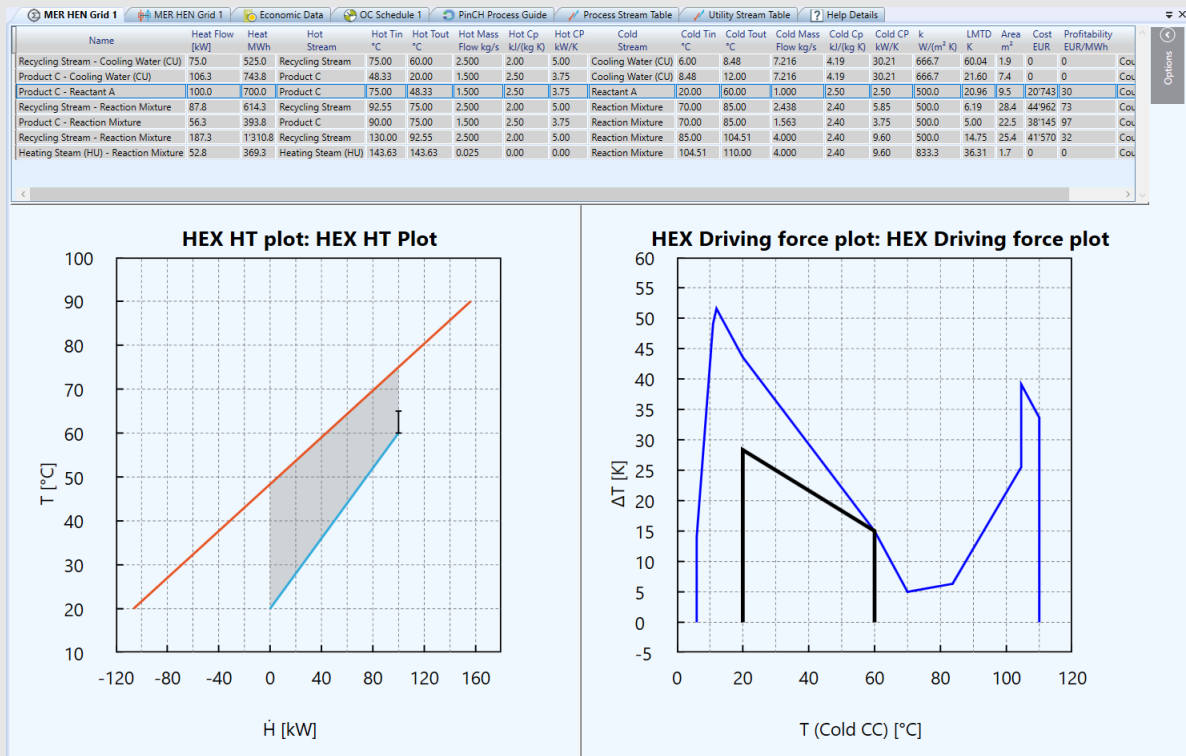


Abbildung 19: Driving Force Plot für den HEX "Product C – Reactant A"

Um die Driving Force zu optimieren, muss der Wärmekapazitätsstrom CP der jeweiligen Stöme angepasst werden. Dies ist nur möglich, indem neue Splits eingeführt werden oder das Design neu aufgebaut wird (Wärmeübertragung zu anderen Strömen als zuvor). In unserem Fallbeispiel wird auf die Optimierung mit Hilfe der Driving Force verzichtet.

Oben rechts in Bild befinden sich die (HEX-)Options. Dort können Sie den HEX-Typ ändern (als Default werden Gegenstrom-HEX verwendet) und die Kosten der einzelnen HEX anpassen.

IV Optimierter Prozess

Übertragen wir das erstellte MER HEN auf das zu Beginn gezeigte Verfahrensfliessbild, erhalten wir das folgende Schema:

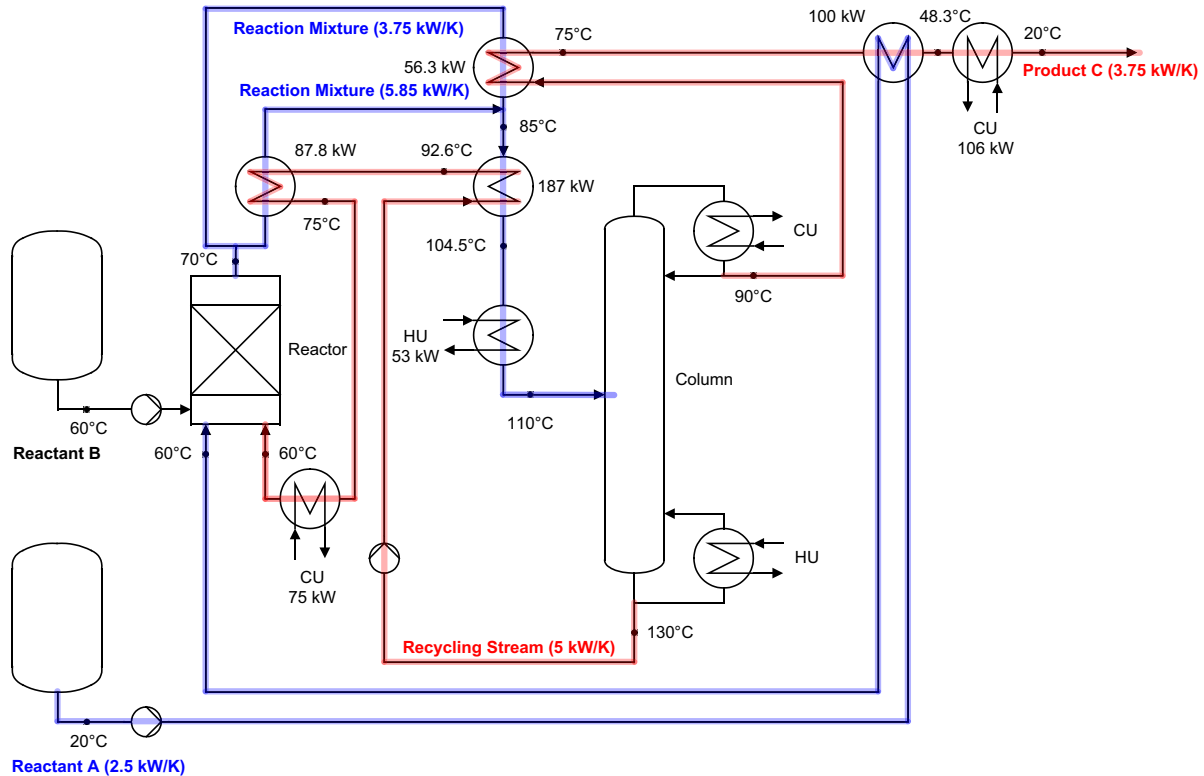


Abbildung 20: Verfahrensfliessbild der optimierten Produktionsanlage

Durch das neue Anlagendesign können im Vergleich zur bestehenden Anlage 84 % an HU und 60 % an CU und in Summe 210'770 €/a Energiekosten eingespart werden. Die jährlichen Gesamtkosten der optimierten Anlage belaufen sich auf ca. 131'000 €/a und werden somit um 54 % reduziert.

Tabelle 4: Vergleich der bestehenden und optimierten Anlage

	Hot Utility		Cold Utility		Energiekosten	Inv. Kosten	Jährliche Gesamtkosten
	[kW]	[MWh/a]	[kW]	[MWh/a]	[€/a]	[€]	[€/a]
Bestehendes Design	326	2'282	456	3'192	287'420	0	287'420
Optimiertes Design	53	371	181	1'267	76'650	145'400	131'030
Einsparung	273	1'911	275	1'925	210'770	-145'421	156'390

Vielen Dank für Ihre Zeit!

Sie sind nun mit den elementarsten Schritten vertraut, um für einen kontinuierlichen Prozess eine Pinch-Analyse mit [PinCH](http://www.pinch-analyse.ch) durchzuführen. Wann immer Sie Fragen haben, können Sie sich ungeniert 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](http://www.pinch-analyse.ch) und bedanken uns herzlich für Ihre Zeit! Für weitere Informationen besuchen Sie bitte unsere Website www.pinch-analyse.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
Prof. Dr. Beat Wellig
T +41 41 349 32 57
pinch@hslu.ch

Kontakt 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
Dr. Pierre Krummenacher
T +41 24 557 61 54
pinch@heig-vd.ch



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