

PinCH Tutorial 4

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 Verfahrensfliessbildern, 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 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 4](#) vor sich. Darin geht es um die Integration eines thermischen Energiespeichers in eine Natriumsulfatproduktionsanlage. Das [Tutorial 4](#) ist wie folgt aufgebaut:

Inhaltsverzeichnis

I. Einführung Tutorial 4	2
II. Fallbeispiel: Chemischer Prozess	3
III. 10 Steps in PinCH	6
IV. Optimierter Prozess	15

I Einführung [Tutorial 4](#)

Lernziel: Verstehen wie mit [PinCH](#) ein thermischer Energiespeicher systematisch integriert werden kann.

Dauer: 1-2 Stunden

Das [Tutorial 4](#) baut auf den Ergebnissen von [Tutorial 3](#) auf, d. h. es wird vorausgesetzt, dass Sie das [Tutorial 3](#) bearbeitet haben. Das Tutorial führt Sie wiederum Schritt für Schritt durch die Pinch-Analyse und Sie lernen dabei die Bedienung und die Möglichkeiten der Software kennen. Für die Integration thermischer Energiespeicher durchlaufen Sie folgende Schritte (die Schritte 7 und 9 werden für dieses Fallbeispiel nicht benötigt):

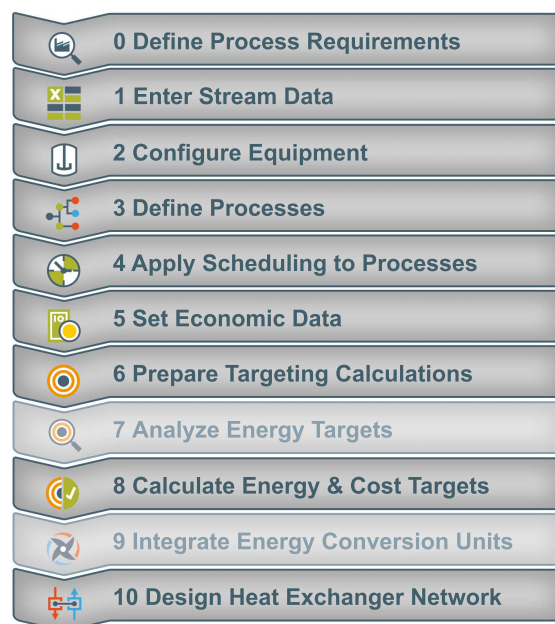


Abbildung 1: Ablauf in [PinCH](#) für die Integration eines thermischen Energiespeichers

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

II Fallbeispiel: Chemischer Prozess

Da dieses Tutorial den Prozess aus [Tutorial 3](#) behandelt, wird auf eine detaillierte Beschreibung der Anlage verzichtet. Insbesondere sind der Zeitplan und die Energieversorgung identisch und nicht mehr aufgeführt. Wir integrieren in diesem Tutorial einen thermischen Energiespeicher. Für die Funktionsweise der in [PinCH](#) betrachteten Speicher (Schichtspeicher sowie Speicher mit fixer Temperatur und variabler Masse) sei an dieser Stelle auf das [BFE-Handbuch](#) verwiesen.

Prozessbeschreibung

Die in [Tutorial 3](#) auf direkte Wärmerückgewinnung (WRG) optimierte Produktionsanlage zur Herstellung eines Nährsalzes wird in diesem Tutorial weiter bearbeitet. Wir betrachten hier nur die nicht-überlappende Betriebsweise.

Nach Auflösung des anorganischen Salzes (Inorganic Salt) im wasserbasierten Lösungsmittel (Solvent) im Rührkessel B100 wird das Additiv (Additive) im Reaktor C100 zugegeben. Die Lösung wird im Reaktor C100 eingedampft. Mittels Kühlungskristallisation wird im Kristallisator B102 der Reinstoff gewonnen. Die detaillierten Verfahrensschritte sind in [Tutorial 3](#) beschrieben. Der auf direkte WRG optimierte Prozess ist in [Abbildung 2](#) dargestellt.

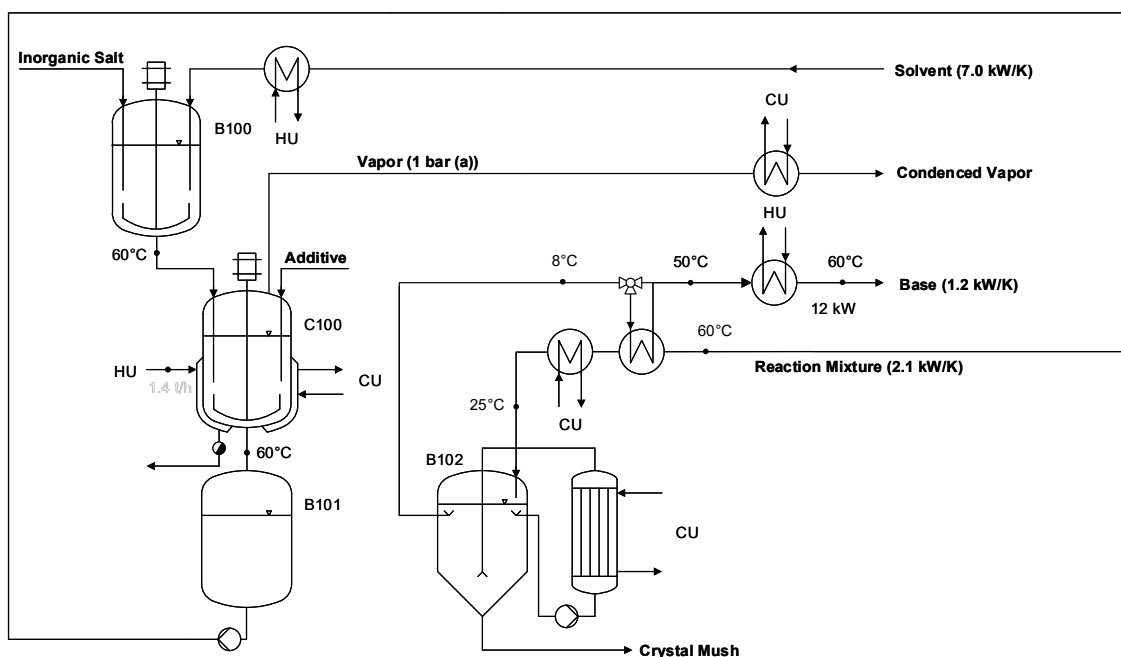


Abbildung 2: Verfahrensfliessbild der auf direkte WRG optimierten Produktionsanlage

Investitionskosten

In diesem Fallbeispiel sind die Investitionskosten für das kombinierte Wärmeübertrager- und Speicher-Netzwerk (Heat Exchanger and Storage Network, HESN) zu berücksichtigen. Da wir in diesem Tutorial keine ECUs betrachten, gilt:

$$C_{Inv} = C_{HESN} \quad (1)$$

Die Kosten für das HESN setzen sich aus den Kosten für den Speicherbehälter (Heat Storage, HS) C_{HS} , des Speichermediums (Storage Medium, SM) C_{SM} , den Wärmeübertragern (Heat Exchanger, HEX) C_{HEX} sowie einem von der Speichergröße unabhängigen Fixbetrag pro Zwischenkreislauf (Intermediate Loops, IL) C_{IL} zusammen. Der Fixbetrag pro IL kann in [Step 8](#) vom Benutzer gewählt werden. Den Aufbau eines Schichtspeichers mit den verwendeten Begriffen finden Sie in [Abbildung 11](#) in [Step 8](#) auf Seite 13.

$$C_{HESN} = \sum_{HS} (C_{HS} + C_{SM} + C_{IL})_{HS} + \sum_{HEX} C_{HEX} \quad (2)$$

Die Kosten für die Wärmeübertrager werden wie in [Tutorial 1](#) berechnet:

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

wobei $C_0 = 0$, $C_b = 110'000 \text{ €}$, $A_b = 100 \text{ m}^2$ und $m = 0.71$ (siehe [Tutorial 1](#)).

Die Kosten für die HS und das SM werden in Abhängigkeit des Speichervolumens V bzw. der Masse des Speichermediums m_{SM} berechnet:

$$C_{HS} = C_0 + C_b \cdot \left(\frac{V}{V_b} \right)^m \quad \text{bzw.} \quad C_{SM} = m_{SM} \cdot c_{SM} \quad (4)$$

In diesem Fallbeispiel verwenden wir folgende Werte:

- Grundkosten des HS (unabhängig von dem Speichervolumen): $C_0 = 0 \text{ €}$
- Kosten für einen Referenz-HS ($b = \text{base}$): $C_b = 150'000 \text{ €}$
- Volumen des Referenz-HS: $V_b = 100 \text{ m}^3$
- Degressionsexponent: $m = 0.71$
- Spezifische Kosten des SM (hier Wasser): $c_{SM} = 0.001 \text{ €/kg}$

Bei den Investitionskosten handelt es sich um die Gesamtkosten für die installierten und in Betrieb genommene HESN.

Gesamtkosten

Während der Amortisationszeit, d. h. nach der Umsetzung der direkten WRG-Massnahmen, betragen die jährlichen Gesamtkosten $C_{tot} \text{ [€/a]}$ wie in [Tutorial 3](#) ersichtlich $50'800 \text{ €}$.

Problemstellung

Das Unternehmen möchte die auf direkte WRG optimierte Produktionsanlage aus [Tutorial 3](#) auf das indirekte WRG-Potenzial untersuchen. Es soll geprüft werden, ob die Integration eines thermischen Energiespeichers sinnvoll ist. In diesem Tutorial zeigen wir Ihnen, wie Sie die Analyse und Optimierung mit der Software [PinCH](#) systematisch und zielführend erarbeiten können.



Step 0: Define Process Requirements

Die Prozessanforderungen für die indirekte WRG entsprechen den Heiz- und Kühlbedürfnissen, welche nicht durch direkte WRG abgedeckt werden können. Die Prozessanforderungen für die indirekte WRG der Natriumsalzproduktion im nicht überlappenden Betriebsfall sind in Abbildung 3 ersichtlich und in Tabelle 1 spezifiziert. Wir arbeiten nun direkt mit dem Wärmekapazitätsstrom $CP = \dot{m} \cdot c_p$, da wir die Werte bereits aus Tutorial 3 kennen. Der Prozess-Strom Base wird Hilfe der direkten WRG vom Prozess-Stroms Reaction Mixture von 8 °C auf 50 °C erwärmt. Da der Prozess-Strom Base aber noch 30 Minuten länger auftritt (zum Entleeren des Kristallisators) und während dieser Dauer von 8 °C auf 60 °C erwärmt werden muss, müssen diese beiden Prozessanforderungen als jeweils ein Prozess-Strom definiert werden.

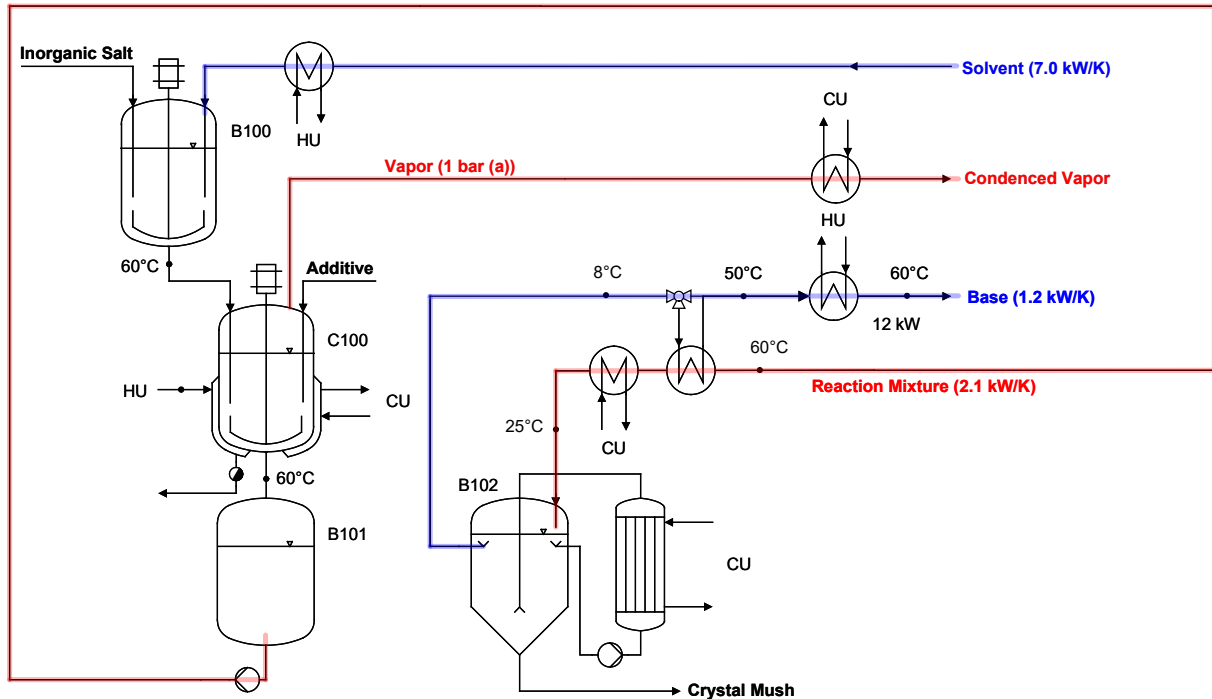


Abbildung 3: Verfahrensflussbild mit Prozessanforderungen

Tabelle 1: Prozessanforderungen

Prozessanforderung	T_{in} [°C]	T_{out} [°C]	CP [kW/K]	α [W/(m ² K)]	t_{start} [h]	t_{stop} [h]
Lösungsmittel (Solvent)	20.0	80.0	7.00	2'000	0.0	1.0
Brüden (Vapor)	x=1	x=0	-*	4'000	2.5	4.5
Reaktionsmittel (Reaction Mixture)	36.3	25.0	2.11	500	7.5	10.5
Lauge (Base), TS3	50.0	60.0	1.19	500	7.5	10.5
Lauge (Base), TS4	8.0	60.0	1.19	500	10.5	11.0

* Kondensation bei $p = 1 \text{ bar(a)}$

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 kWh gearbeitet. Wie Sie dabei vorgehen müssen, wird in [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 geben Sie ihm einen passenden Namen.



Step 1: Enter Stream Data

Erstellen Sie ein neues Projekt und benennen Sie es "Fine Chemistry AG". Tragen Sie die Prozessanforderungen in die Process Stream Table ein. Die vollständige Process Stream Table sieht folgendermassen aus:

+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	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
	Solvent		20	80	1.66667	4.2	-	2000	-	7	420	Simple	-	<input type="checkbox"/>	0	1
	Vapor		x1	x0	0.2778	-	2257.08	4000	1	-	627.02	Water	-	<input type="checkbox"/>	2.5	4.5
	Reaction Mixture		39.1	25	0.602	3.5	-	500	-	2.11	29.71	Simple	-	<input type="checkbox"/>	7.5	10.5
	Base, TS3		45	60	0.397	3	-	500	-	1.19	17.87	Simple	-	<input type="checkbox"/>	7.5	10.5
	Base, TS4		8	60	0.397	3	-	500	-	1.19	61.93	Simple	-	<input type="checkbox"/>	10.5	11

Abbildung 4: Process Stream Table

In einem zweiten Schritt müssen die zur Verfügung stehenden Utilities (Heiz- und Kühlmedien) definiert werden. Füllen Sie die Utility Stream Table gemäss den Daten von [Tutorial 3](#) aus. Die fertige 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/kWh	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg
	Heating Steam (HU)		x1	x0	-	2181.27	5000	2.5	0.080	Water	-
	Cooling Water (CU)		8	14	4.1884	-	2000	1	0.030	Water	-

Abbildung 5: Utility Stream Table



Step 2: Configure Equipment





Konsultieren Sie für das Definieren der Equipments [Tutorial 3](#). Der nun unterteilte Prozess-Strom Base benötigt ein Shared Equipment (vgl. [Tutorial 2](#)). Es ergibt sich folgende Zugehörigkeit:

- Solvent → B100
- Vapor → C100
- Reaction Mixture → B101
- Base, TS3 & Base, TS4 → B102 (shared)



Step 3: Define Processes

Löschen Sie den vordefinierten Prozess "Process 1" unter BaseCase und erstellen Sie einen Batch-Prozess. Gehen Sie dazu wie folgt vor:

-  Rechtsklick auf "Process 1" im Project Explorer
-  Remove Process wählen
-  Rechtsklick auf "Processes"
-  Add Batch Process wählen








Bennenen Sie den Batch-Prozess nun in "Nutrient Salt Production" um und weisen Sie diesem alle definierten Prozessanforderungen zu.



Step 4: Apply Scheduling to Processes

Schedules werden zur Definition des zeitlichen Ablaufs der in [Step 3](#) definierten Prozesse benötigt. Gibt es mehrere, zumindest teilweise parallel ablaufende Prozesse, könnten Betriebsfälle (Operating Cases) auftreten, während denen ein Wärmetransfer zwischen den Prozessen möglich ist.

Erstellen Sie analog zu [Tutorial 3](#) den Non-Overlapping Operating Case. Gehen Sie wie folgt vor:

-  In Spalte Timebase "Batch Daily" auswählen
-  Als Betriebstage Mo-Sa anwählen
-  Daytime Start: 00:00 Uhr einstellen
-  CW Start: 1 eingeben
-  # Weeks: 48 eingeben
-  Batch Cycle Duration (BCD): 11 h eingeben
-  # Batches: 2 eingeben

Das Equipment-Wise Repeated Operation Period-Gantt (EROP-Gantt) Diagramm des Prozesses ist in [Abbildung 6](#) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Ströme Vapor und Solvent nicht zeitgleich auftreten. Dort *könnte* indirektes WRG-Potenzial existieren. Wir werden dies im [Step 8](#) genauer untersuchen.

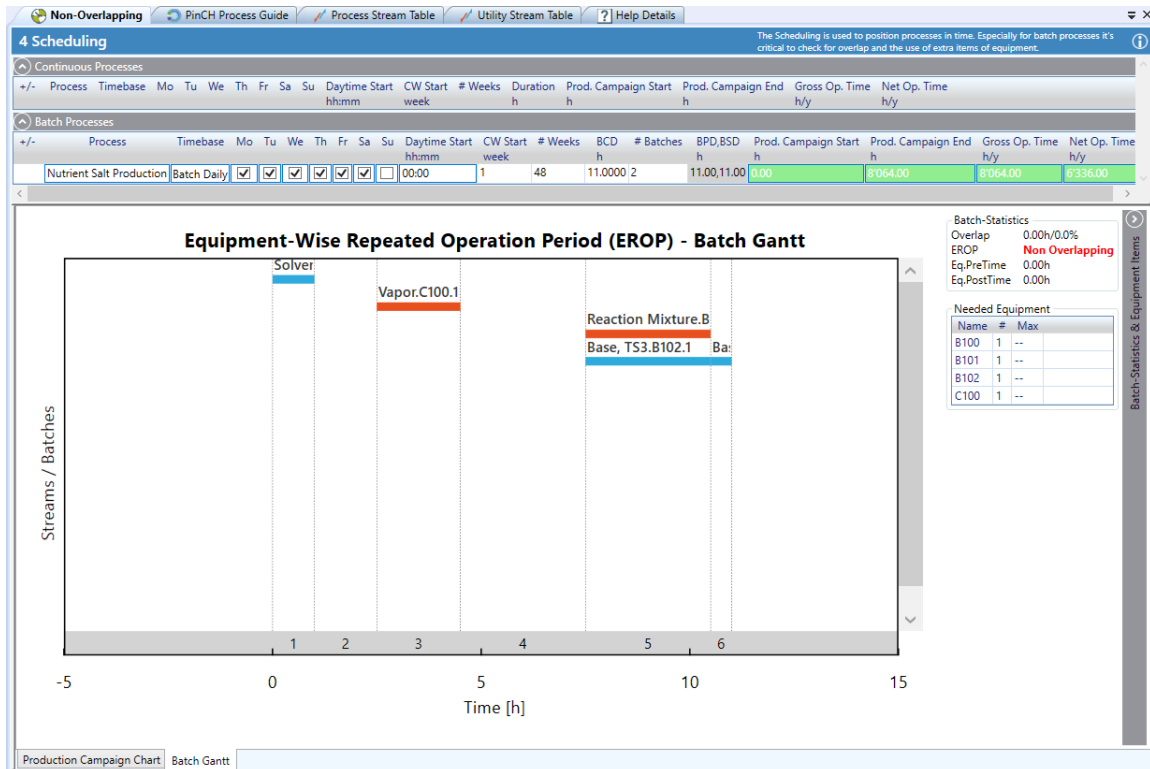


Abbildung 6: EROP des nicht-überlappenden Batch-Prozesses



Step 5: Set Economic Data

Die Angabe von wirtschaftlichen Kenngrößen ist erforderlich für die Berechnung von Investitionskosten. In PinCH werden die Investitionskosten der Wärmeübertrager und Speicher-Systeme zur Erfüllung der Prozessanforderungen berechnet. Darin enthalten sind Wärmeübertrager zwischen Prozess-Strömen (Wärmerückgewinnung), Wärmeübertrager zwischen einem Prozess-Strom und Utilities sowie die Wärmeübertrager des Speichersystems.

Unter [Storage: Media Costs and Media Properties](#) sind Kosten- und Stoffdaten für die Speichermedien definiert. Sie können diese anpassen oder eigene Speichermedien definieren. Dabei sind die zwei Speichermedien Wasser und Wärmeträgeröl vordefiniert. In unserem Fallbeispiel betrachten wir einen Schichtspeicher mit Wasser als Speichermedium und verwenden die im Abschnitt Investitionskosten auf Seite 3 definierten Kostenparameter.

Öffnen Sie das Register Economic Data und passen Sie die Kenngrößen gemäss Vorgaben an. Da es sich um eine bestehende Anlage handelt, können die Investitionskosten für die Utility-Wärmeübertrager zu Null gesetzt werden.

Der vollständige Datensatz enthält 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	0	110'000.0	100	0.71
Hot Utility Heat Exchanger	0	0.0	100	0.71
Cold Utility Heat Exchanger	0	0.0	100	0.71
ISSP Heat Exchanger	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	150'000.0	100	0.71	FTVM
Stratified	0	150'000.0	100	0.71	Stratified

Storage: Media Costs and Media Properties

$$C = C_b \cdot m_{sm}$$

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: 0.237 1/y Maintenance: %/y Investment Costs

Electricity

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

Abbildung 7: Economic Data

Ihr Project Explorer hat nun folgenden Aufbau:

Abbildung 8: 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 die Energie- und Kostenziele berechnen, indem Sie im Target Explorer eine Target Group erstellen. Ihr Target Explorer sollte nun folgenden Aufbau haben:

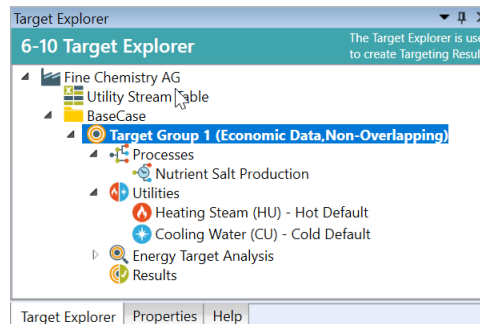


Abbildung 9: Target Explorer

Wenn Sie Probleme mit dem Erstellen der Target Group haben, konsultieren Sie bitte das [Tutorial 1](#): In [Step 6](#) wird das Vorgehen Schritt für Schritt erklärt.

Step 7: Analyze Energy Targets

In [Tutorial 3](#) ist bereits eine detaillierte Analyse der Energy Targets für direkte und indirekte WRG durchgeführt worden. Das identifizierte indirekte WRG-Potenzial kann nun in [Step 8](#) genauer analysiert werden.

Step 8: Calculate Energy & Cost Targets

Ein Schlüsselaspekt der Pinch-Analyse ist die Berechnung von Energie- und Kostenzielen vor der (ansonsten oft subjektiv beeinflussten) Untersuchung einzelner WRG-Massnahmen. Nachdem in [Tutorial 3](#) das direkte WRG-Potenzial identifiziert und erschlossen wurde, werden wir in [Step 8](#) dieses Tutorials die indirekte WRG behandeln. Das Targeting für die indirekte WRG dient zur systematischen Integration von thermischen Energiespeichern. Wir werden zuerst mit Hilfe des Indirect Source and Sink Profile (ISSP) die zu berücksichtigenden Ströme selektieren und das indirekte WRG-Potenzial identifizieren. Anschliessend werden wir den Speicher genauer spezifizieren und dessen Wirtschaftlichkeit betrachten.

Starten Sie das Targeting für die "Target Group 1":

 Rechtsklick auf [Results](#)

 Calculate Target Result with...  Indirect Heat Recovery wählen

Im neuen Fenster, ersichtlich in [Abbildung 10](#), befindet sich auf der linken Seite das ISSP, welches das indirekte WRG-Potenzial der Nährsalzproduktion aufzeigt.

Zusatzinformation: Das Targeting für die indirekte WRG wird auf Basis des ISSP durchgeführt. Das ISSP basiert auf dem Time Average Modell (TAM), gewichtet aber die Relevanz der Ströme für die indirekte WRG. Die Zeitdauer und der Wärmeübergangskoeffizient α jedes Stroms fließen in diese Gewichtung ein. Je länger ein Strom existiert und je höher dessen α -Wert ist, desto höher ist auch dessen

Relevanz für die indirekte WRG. Für die genaueren Hintergründe des ISSP sei auf das [BFE-Handbuch](#) verwiesen.

Die rote und blaue Kurve beschreiben den Heiz- und Kühlbedarf. Sie sind entsprechend der Relevanz für die indirekte WRG in den Temperaturen verschoben (vgl. [BFE-Handbuch](#)). Die schwarze Kurve dazwischen beschreibt einen Schichtspeicher, wobei der blaue Punkt die kalte und der rote Punkte die warme Schicht repräsentiert. In den Tabellen im unteren Bereich finden Sie die Sources und Sinks, welche mit Hilfe des Speichers indirekt gekoppelt werden können. Mit dem Haken vor den jeweiligen Strömen können diese an- bzw. abgewählt werden.

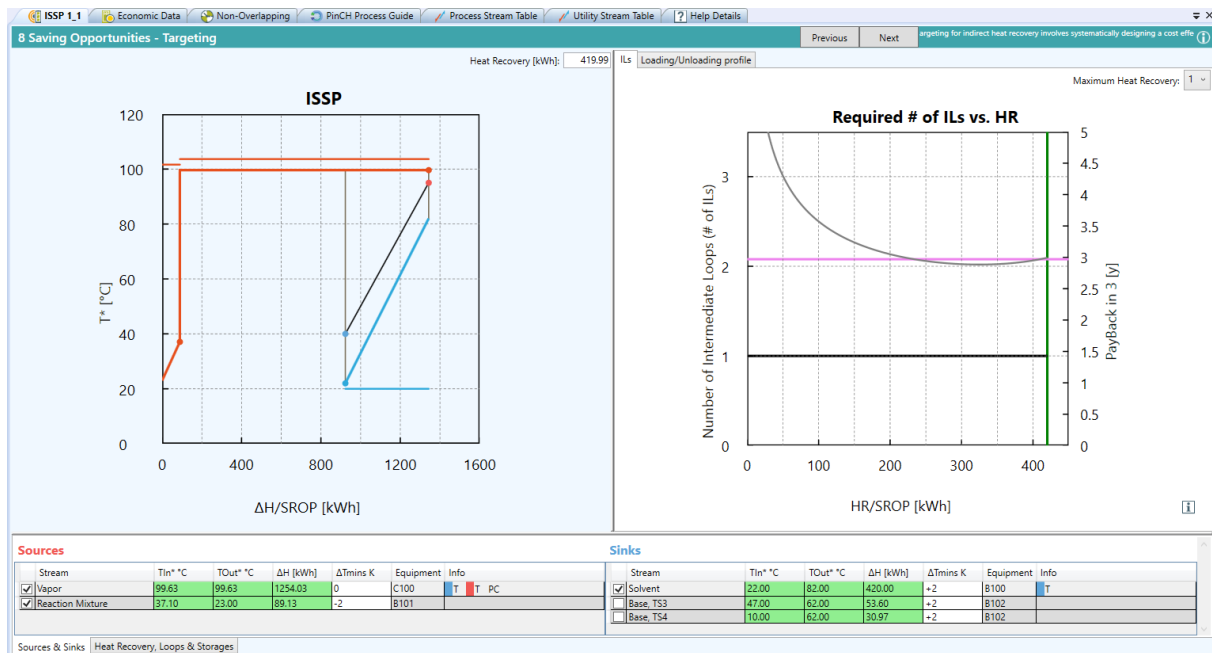


Abbildung 10: ISSP

Hinweis: Im Tab Properties (beim Target Explorer) unter "View sources and sinks" können Sie inaktive Ströme ein- und ausblenden und zusätzlich mit "Show streams in chart" die einzelnen Ströme im ISSP visualisieren. Durch Anwählen dieser Option erscheinen im ISSP horizontale Linien, welche den Enthalpiebereich des jeweiligen Stroms darstellen. Durch einen Klick auf eine dieser Linien wird auch dessen Temperaturbereich dargestellt.

Unter Storage können Sie den Speicher spezifizieren. Als Default ist ein Schichtspeicher mit Wasser als Speichermedium definiert. Die in der Economic Data definierten Speichermedien können hier ausgewählt werden. Zusätzlich können Sie einen Sicherheitsfaktor für das Speichervolumen festlegen.

Zusatzinformation:

Bevor wir mit der Selektion der Ströme für die indirekte WRG beginnen, wollen wir die relevanten Eigenschaften der Schichtspeicher (Stratified Storage, SS) erörtern. In 11 ist ein allgemeiner SS mit drei Schichten dargestellt. Zum Beladen werden Hot Streams, zum Entladen Cold Streams verwendet. Das Speichermedium wird über einen IL von einer Schicht in eine andere Schicht gepumpt und dabei im Zwischenkreislauf-HEX erwärmt oder abgekühlt. Die Temperaturen der Schichten sind so zu wählen, dass die Prozess-Ströme auf die gewünschten Austrittstemperaturen gebracht und die

Schichttemperaturen eingehalten werden. Die Eintrittstemperatur der Cold Streams beschränkt dabei die untere Schichttemperatur, jene der Hot Streams die obere Schichttemperatur. Da ein SS ein sensibler Wärmespeicher ist, ist die Differenz zwischen den Schichttemperaturen von entscheidender Bedeutung für die Speicherkapazität. Kann also mittels der Wahl der "richtigen" Sources und Sinks die Differenz der Schichttemperaturen erhöht werden, so ermöglicht dies dieselbe Energiemenge in einem kleineren Speicher zu speichern.

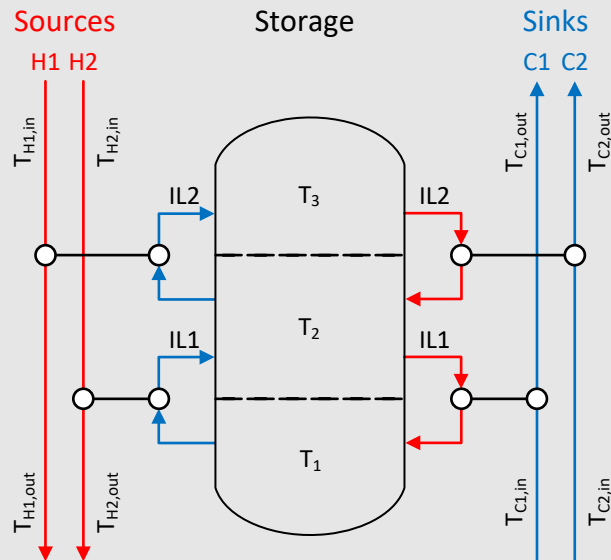


Abbildung 11: Allgemeiner Schichtspeicher mit drei Schichten, zwei ILs je zwei Sources (Hot Streams, H1 und H2) und Sinks (Cold Streams, C1 und C2)

Da der Strom "Base, TS3" (Cold Stream) mit der verschobenen Eintrittstemperatur $T_{in}^* = 47^\circ\text{C}$ im Vergleich zu den beiden anderen Strömen den IL des Speichers nur bis maximal 47°C abkühlen kann, würde er bei einem Schichtspeicher mit zwei Schichten die untere Temperatur stark limitieren. Dies würde dazu führen, dass für die gleiche Speicherkapazität ein wesentlich grösserer Speicher installiert werden müsste. Wir wählen den Strom "Base, TS3" deswegen und in Anbetracht der kleinen Wärmemenge (ca. 54 kWh) ab. Ohne diesen Strom kann die untere Schicht nun theoretisch bis auf 22°C abgesenkt werden. Zur Reduktion eines weiteren IL wählen wir in Anbetracht der kleinen Wärmemenge (ca. 31 kWh) den Strom "Base, TS4" ebenfalls ab. Oberhalb des ISSP können Sie bei Heat Recovery angeben, wie viel WRG der Speicher abdecken soll. In unserem Fall wählen wir 420 kWh, was dem gesamten Wärmebedarf des Stroms "Solvent" entspricht.

Klicken Sie in die Checkbox vor dem Strom "Base, TS3".

Klicken Sie in die Checkbox vor dem Strom "Base, TS4".

Für die Integration des Speichers klicken Sie oberhalb des "Required # of ILs vs. HR" Graphes auf Next. Nun erscheinen zwei neue Graphen und zwei neue Tabellen (Abbildung 12). Das Loading/Unloading Profile zeigt das Volumen der Schichten über die Zeit an. In der Tabelle "Specification" können Sie nun die Temperaturen der beiden Schichten einstellen.

Wählen Sie für $T_{low} = 40^\circ\text{C}$ und für $T_{high} = 95^\circ\text{C}$.

Auf der rechten Seite der Tabelle wird das benötigte Speichervolumen, die dazugehörige Masse und die Anzahl der benötigten Wärmeübertrager sowie die gesamthaft benötigte Wärmeübertragerfläche angegeben.

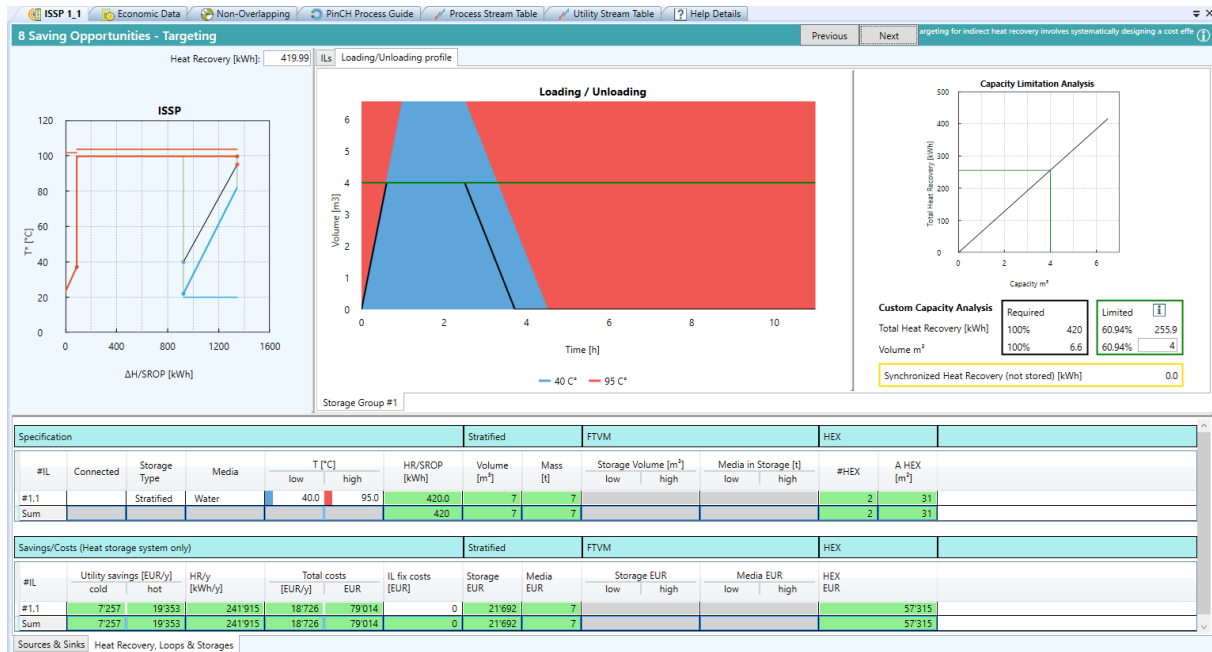


Abbildung 12: ISSP, Loading/Unloading Profile und Capacity Limitation Graph

Hinweis: Mit der Capacity Limitation Analysis kann berechnet werden, wie viel WRG mit einem Speicher mit einem limitierten Volumen möglich ist. Sie können unterhalb des Graphen das Volumen des Speichers definieren und erhalten in Prozent und absolut in Kilowattstunden die noch mögliche WRG. Im Loading/Unloading Profile wird nun mit der grünen Linie und der schwarzen Kurve das Loading/Unloading Profile des limitierten Speichers dargestellt. Diese Kurven können in den Properties unter Storage bei "Draw capacity limitation" ein- und ausgeblendet werden. Wie in Abbildung 12 ersichtlich ist, kann in unserem Fall mit einem 4 m³ Speicher 61% des WRG-Potenzials genutzt werden. Da in unserem Fallbeispiel der Speicher nur gerade einmal be- bzw. entladen wird, stellt der Graph der Capacity Limitation Analysis lediglich eine Gerade dar. Würde der Speicher mehrere Male je SROP be- bzw. entladen, so könnte mit Hilfe der Capacity Limitation Analysis ein kosteneffektiverer Speicher gefunden werden.

In der Tabelle "Savings/Costs" werden die Energie- und Betriebskosteneinsparungen (Utility Savings) und die Investitionskosten angegeben. Mit dem integrierten Schichtspeicher können folglich 241'900 kWh/a eingespart werden. Dadurch sinken die jährlichen Betriebskosten um 26'600 €/a wobei die Investitionen für den Speicher inkl. Wärmeübertrager 79'000 € betragen.

Step 9: Integrate Energy Conversion Units (ECUs)

In vielen industriellen Prozessen ist trotz 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 oder Organic Rankine Cycle, ORC). 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 Kostenreduktion) der Energieversorgung vorzunehmen, kann in PinCH die korrekte Integration einer Wärmepumpe, eines mechanischen oder thermischen Brüdenverdichters, einer ORC-Anlage sowie eines BHKW durchgeführt werden.

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 HESN erstellen. Das HESN ist weniger komplex als ein typisches Verfahrensfließbild, zeigt aber auf, welche Prozess-Ströme in welcher Reihenfolge mit Wärmeübertragern mit dem Speicher verbunden werden sollen. Basierend auf dieser Grundlage kann ein Anlagendesign erarbeitet werden. Da im Targeting die zu berücksichtigenden Ströme selektiert und die Speicher-Temperaturen gewählt werden, muss ein HESN nicht wie ein herkömmliches HEN aufgebaut werden. Die Informationen im Targeting definieren bereits alle Kopplungen und das HESN kann somit lediglich angezeigt werden.

Um ein HESN zu erstellen gehen Sie in den Target Explorer, machen einen Rechtsklick auf "ISSP 1_1" und wählen Show HESN Schema.

Durch Anwählen von "Show streams outside heat recovery" in den Properties vom HESN können Sie auch Ströme einblenden lassen, welche nicht mit dem Speicher gekoppelt sind (Reaction Mixture und Base). Zusätzlich können Sie mit "Show massflow on intermediate loop branch" die Massenströme, der Zwischenkreisläufe einblenden. In Abbildung 13 ist das HESN für die Speicherintegration dargestellt.

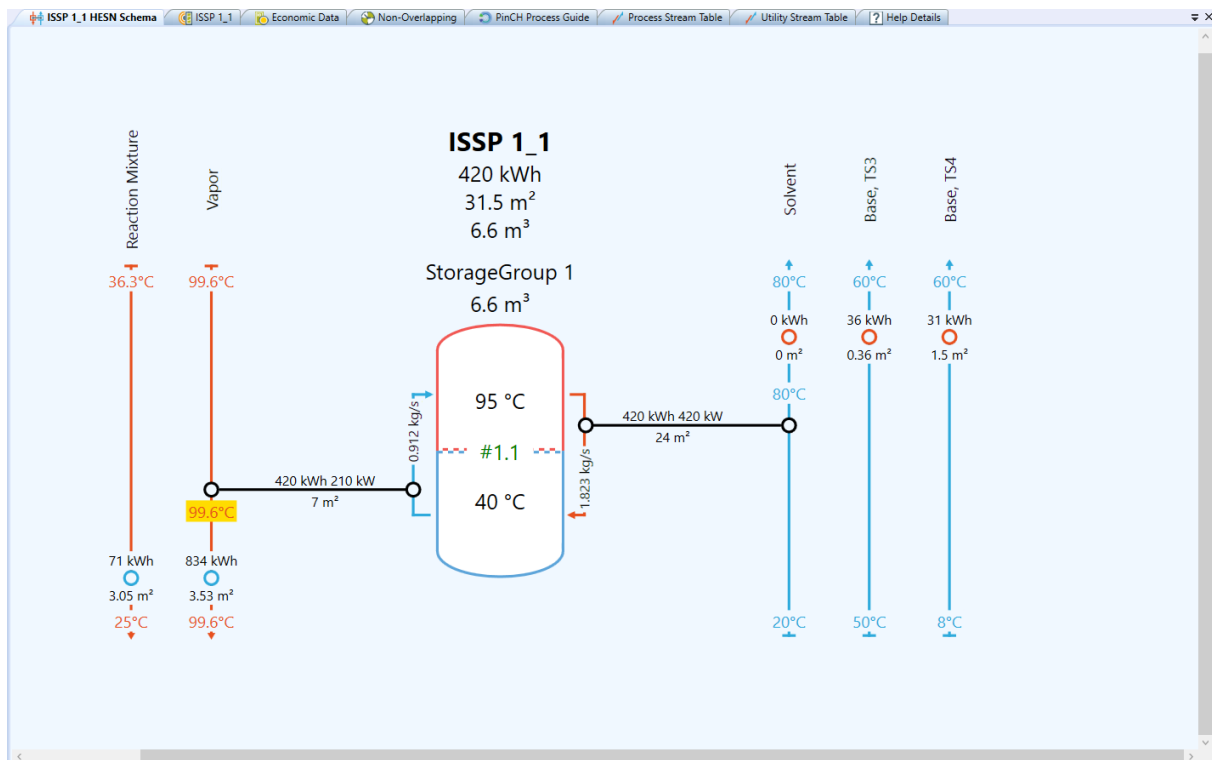


Abbildung 13: HESN des optimierten Prozesses

IV Optimierter Prozess

In [Tutorial 3](#) ist das Verfahrensfliessbild der Natriumsalzproduktion für jeden einzelnen TS dargestellt. Wir übertragen nun das HESN auf das Verfahrensfliessbild. Die Prozess-Ströme, welche durch indirekte WRG abgedeckt werden, sind farblich eingezeichnet. Der Hot Stream (Vapor) tritt nicht gleichzeitig wie der Cold Stream (Solvent) auf. Das Verfahrensfliessbild mit dem integrierten Speicher ist in [Abbildung 14](#) dargestellt.

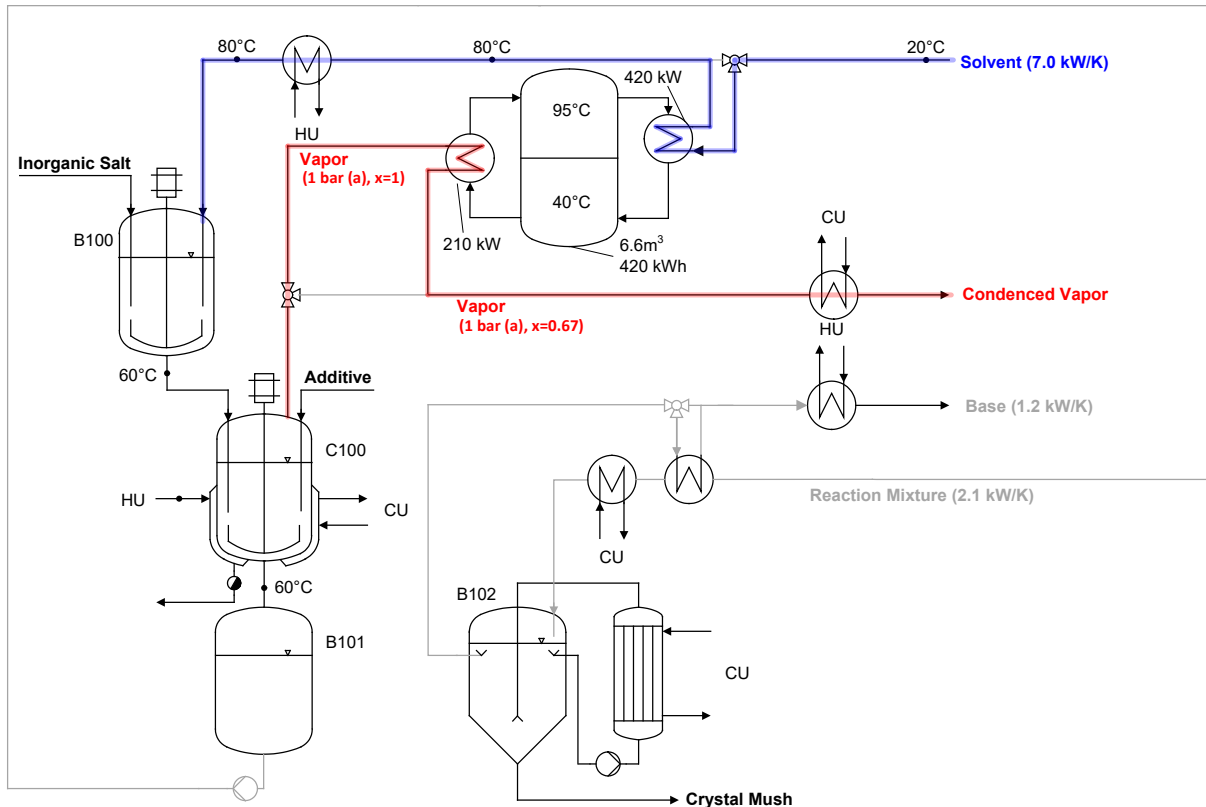


Abbildung 14: Verfahrensfliessbild der Natriumsalzproduktion mit integriertem thermischen Energiespeicher

Mit der Integration des Speichers können die benötigten Utilities reduziert werden. Das installierte Speichersystem verursacht Investitionskosten von 79'000 €. Diese werden über 5 Jahre abgeschrieben und dadurch entstehen jährliche Investitionskosten von 18'700 €. In [Tabelle 2](#) sind die Kosten und der Energiebedarf des Prozesses aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass mittels direkter- und indirekter WRG die Betriebskosten um 64 % reduziert werden können. Während den ersten 5 Jahren reduzieren sich die jährlichen Gesamtkosten damit um 22 %. Nach den 5 Jahren ist die Investition abgeschrieben und die Gesamtkosten entsprechen dann den Betriebskosten. Über einen Zeitraum von 10 Jahren kann mit diesen Massnahmen 235'000 € eingespart werden.

Tabelle 2: Vergleich der bestehenden und optimierten Anlage mit und ohne indirekte WRG

	HU	CU	Betriebskosten	Jährliche Inv. Kosten	Jährliche Gesamtkosten
	[MWh/a]	[MWh/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]
Ausgangslage	367	850	54'858	0	54'858
Direkte WRG	291	774	46'459	4'333	50'792
Direkte & Indirekte WRG	50	532	19'849	23'059	42'908
Einsparung	318	318	35'009	-23'059	11'950

Vielen Dank für Ihre Zeit!

Sie sind nun mit den elementarsten Schritten vertraut, um für einen Batch-Prozess mit thermischem Energiespeicher eine Pinch-Analyse mit PinCH 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 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 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.