

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 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 dazugehörigen 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 das [PinCH-Tutorial 4](#) vor sich. Darin geht es um die Integration eines thermischen Energiespeichers in eine Nhrsalzproduktionsanlage. Das [Tutorial 4](#) ist wie folgt aufgebaut:

Inhaltsverzeichnis

I. Einführung Tutorial 4	2
II. Fallbeispiel: Herstellung eines Nährsalzes	3
III. 10 Steps in PinCH	6
IV. Optimierter Prozess	16

I. Einführung Tutorial 4

Lernziel: Sie verstehen, wie mit [PinCH](#) ein thermischer Energiespeicher in eine bestehende Produktionsanlage 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 fhrt 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 die folgenden Schritte ([Steps 7](#) und [9](#) werden für dieses Fallbeispiel nicht benötigt):

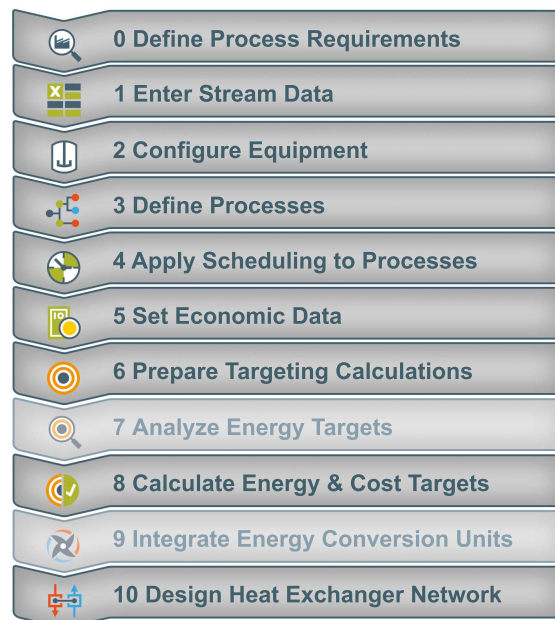


Abbildung 1: Ablauf in PinCH für die Integration eines thermischen Energiespeichers

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

II. Fallbeispiel: Herstellung eines Nährsalzes

Da dieses Tutorial den Prozess aus [Tutorial 3](#) behandelt, wird auf eine detaillierte Beschreibung der Anlage verzichtet. Insbesondere sind der Zeitplan und die Utilities 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 fixierter 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 den sich nicht-überlappenden Betrieb.

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 im [Tutorial 3](#) beschrieben. Der auf direkte WRG optimierte Prozess ist in Abbildung 2 dargestellt.

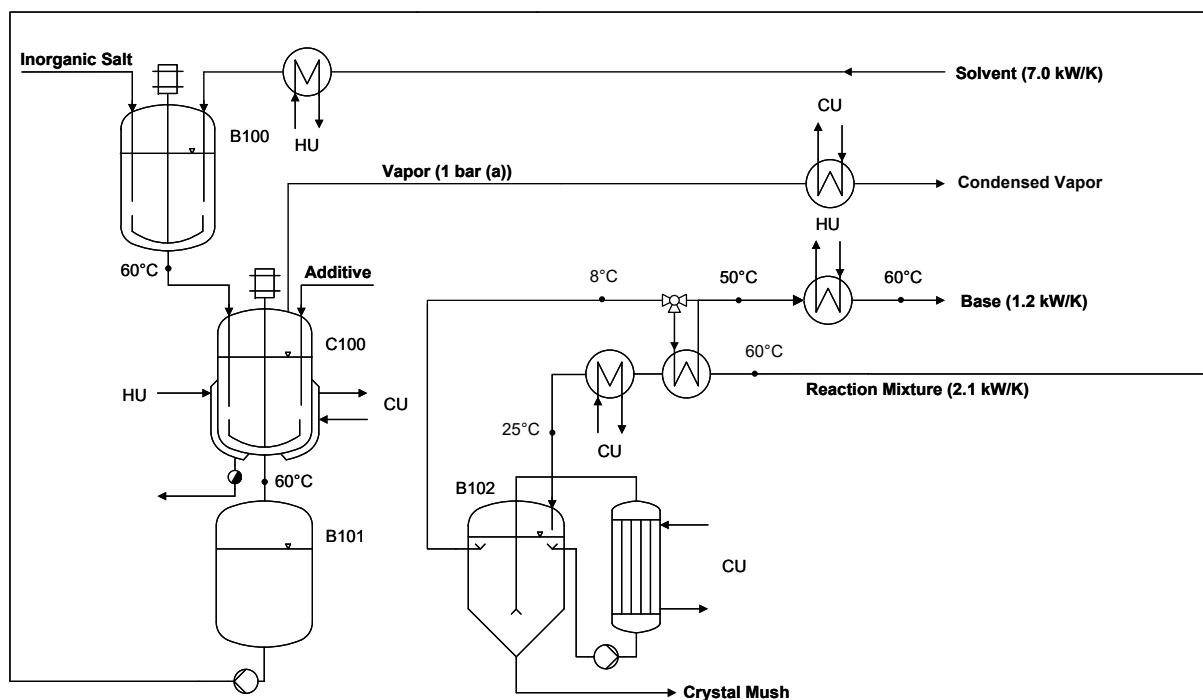


Abbildung 2: Verfahrensfliessbild der auf direkte WRG optimierten Produktionsanlage

Investitionskosten

In diesem Fallbeispiel sind die Investitionskosten für das kombinierte Wärmeübertrager- und Speichernetzwerk (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} , das Speichermedium (Storage Medium, SM) C_{SM} , die Wärmeübertrager (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 im [Step 8](#) vom Benutzer vorgegeben werden. Den Aufbau eines Schichtspeichers finden Sie in Abbildung 11 in [Step 8](#) auf Seite 12.

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

Die Kosten für die HEXs werden wie in [Tutorial 3](#) berechnet:

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

wobei $a = 6'000$, $C_b = 15'000 \text{ €}$, $A_b = 40 \text{ m}^2$, $m = 0.67$ und $f_L = 5$ (siehe [Tutorial 3](#)).

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

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

In diesem Fallbeispiel verwenden wir folgende Werte:

- Grundkosten des HS (unabhängig von dem Speichervolumen): $a = 0 \text{ €}$
- Kosten für einen Referenz-HS ($b = \text{base}$): $C_b = 16'000 \text{ €}$
- Volumen des Referenz-HS: $V_b = 30 \text{ m}^3$
- Degressionsexponent: $m = 0.71$
- Lang-Faktor: $f_L = 3$
- Spezifische Kosten des SM (hier Wasser): $c_{SM} = 0.001 \text{ €/kg}$

Bei den Investitionskosten handelt es sich um die Gesamtkosten für ein installiertes und in Betrieb genommenes HESN.

Gesamtkosten

Während der Abschreibungszeit, d. h. nach der Umsetzung der direkten WRG-Massnahmen, betragen die jährlichen Gesamtkosten $C_{tot} [\text{€/a}]$, wie in [Tutorial 3](#) ersichtlich, 50'320 €.

Problemstellung

Das Unternehmen möchte die auf direkte WRG optimierte Produktionsanlage aus [Tutorial 3](#) auch 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, die nicht durch die direkte WRG abgedeckt werden können. Die Prozessanforderungen für die indirekte WRG der Natriumsalzproduktion im sich nicht-überlappenden Betrieb 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 Prozessstrom Base wird mithilfe der direkten WRG vom Prozessstrom Reaction Mixture von 8 °C auf 50 °C erwärmt. Da der Prozessstrom 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 jeweils als ein Prozessstrom definiert werden.

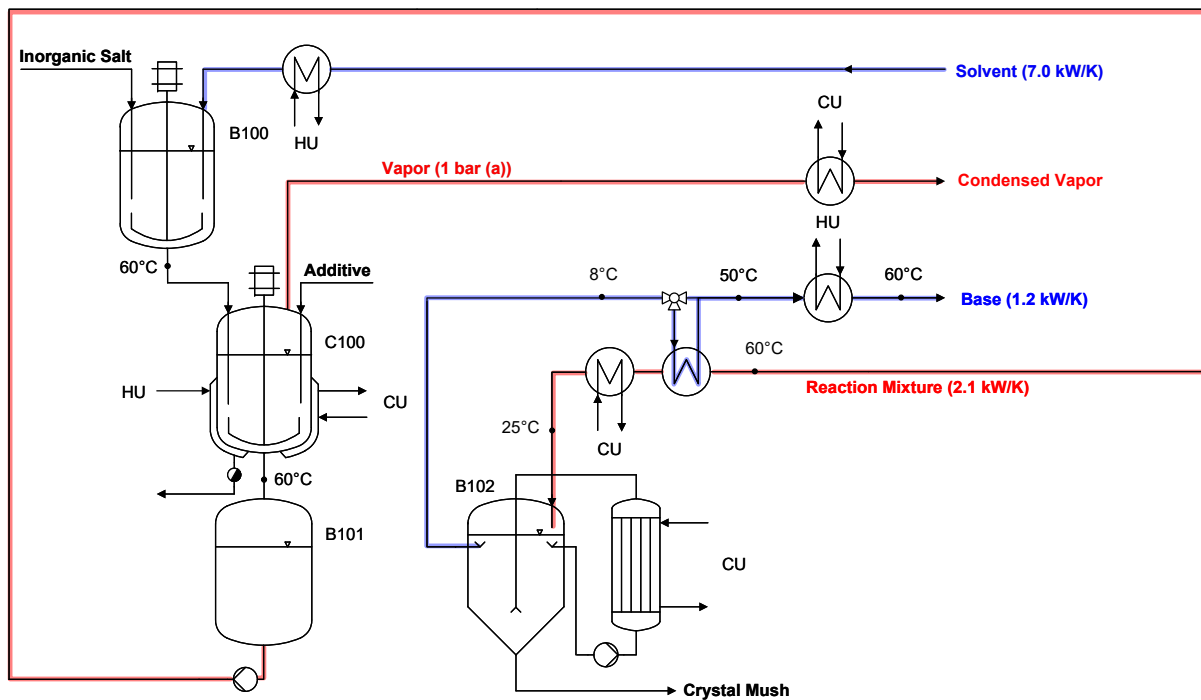


Abbildung 3: Verfahrensflussbild mit Prozessanforderungen

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

* Die Kondensationsenthalpie des Brüdens beträgt bei 1 bar(a) 2'257 kW/kg.

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 ggf. anzupassen. Da in unseren Tutorials die Kosten in € angegeben werden, muss die Währung unter Umständen in den Einstellungen angepasst werden. Wir verwenden einen Wechselkurs von 1 CHF/€. Des Weiteren wird in diesem Tutorial mit den Einheiten in kW und kWh gearbeitet. Wie Sie bei der Anpassung vorgehen, wird in [Tutorial 0](#) erläutert.

Das Tutorial folgt den [10 PinCH Steps](#) (vgl. [Tutorial 0](#)). In den [Steps 1-5](#) werden die prozess-relevanten 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 „Fine Chemistry AG“.



Step 1: Enter Stream Data

Tragen Sie die Prozessanforderungen gemäss Tabelle 1 in die [Process Stream Table](#) ein. Die vollständige [Process Stream Table](#) sieht folgendermassen aus:

+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	m kg/s	Cp kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m² K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	ΔH kW	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg	Soft	tstart dd:hh:mm	tstop dd:hh:mm
	Solvent		20	80	1.66667	4.2	-	2000	-	7	420	Simple	-	☐	00:00:00	00:01:00
	Vapor		x1	x0	0.27778	-	2257.44	4000	1	-	627.07	Water	-	☐	00:02:30	00:04:30
	Reaction Mixture		36.3	25	0.60286	3.5	-	500	-	2.11	23.84	Simple	-	☐	00:07:30	00:10:30
	Base, TS3		50	60	0.39667	3	-	500	-	1.19	11.9	Simple	-	☐	00:07:30	00:10:30
	Base, TS4		8	60	0.39667	3	-	500	-	1.19	61.88	Simple	-	☐	00:00:00	00:00:00

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 in [Tutorial 3](#) aus. Die fertige [Utility Stream Table](#) sieht folgendermassen aus:

+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	Cp kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m² K)	Pressure bar(a)	Utility Cost EUR/kWh	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg
	Heating Steam (HU)		x1	x0	-	2181.14	5000	2.5	0.08	Water	-
	Cooling Water (CU)		8	14	4.1938	-	2000	1	0.03	Water	-

Abbildung 5: Utility Stream Table



Step 2: Configure Equipment

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

- Solvent → B100 (Individual)
- Vapor → C100 (Individual)
- Reaction Mixture → B101 (Individual)
- 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

Benennen Sie den Batch-Prozess nun in „Nutrient Salt Production“ um und weisen Sie diesem alle definierten Prozessanforderungen zu.



Step 4: Apply Scheduling to Processes

Zeitpläne (Schedules) werden zur Definition des zeitlichen Ablaufs der in **Step 3** definierten Prozesse benötigt. Gibt es mehrere, zumindest teilweise parallel ablaufende Prozesse, können 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
-  Für **# Batches** 2 eingeben
-  Als Betriebstage Mo-Sa anwählen
-  Für **Daytime Start** 00:00 Uhr einstellen
-  Für **CW Start** 1 eingeben
-  Für **# Weeks** 48 eingeben
-  Für **Batch Cycle Duration (BCD)** 11 h eingeben

Das **Equipment-Wise Repeated Operation Period Gantt-Diagramm (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.

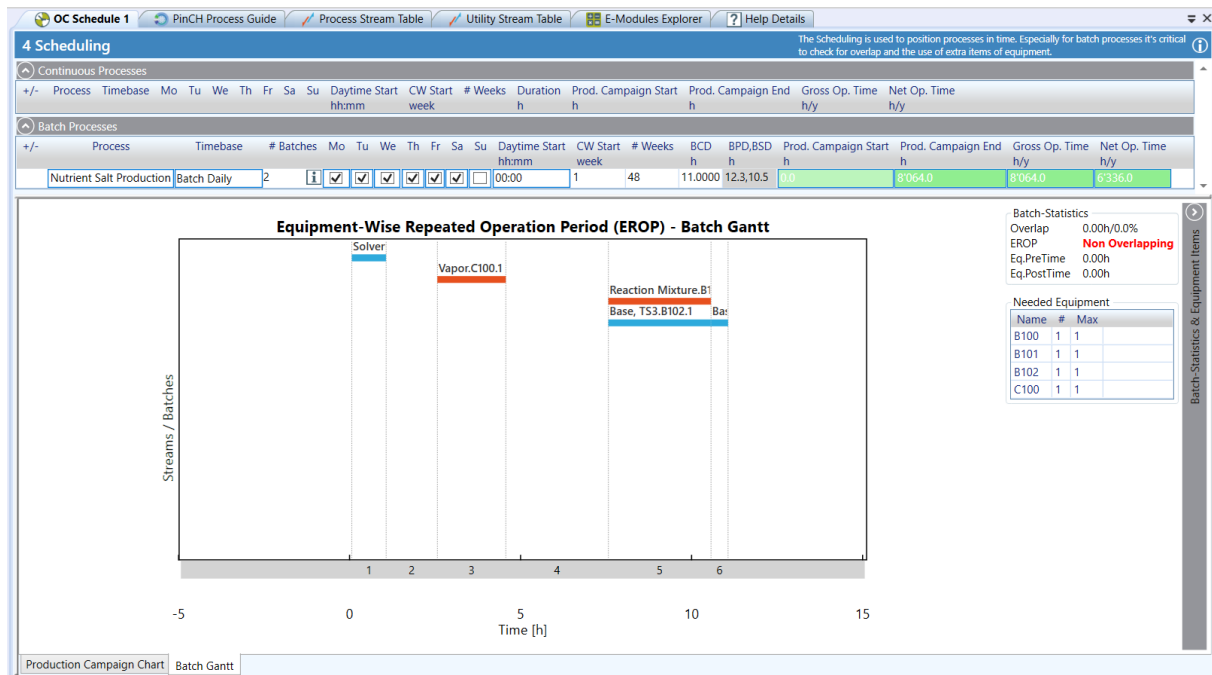


Abbildung 6: EROP des sich nicht-überlappenden Batch-Prozesses



Step 5: Set Economic Data

Die Angabe von wirtschaftlichen Kenngrößen ist erforderlich für die Berechnung von Investitionskosten. In PinCH werden die Investitionskosten der HEXs und Speichersysteme zur Erfüllung der Prozessanforderungen berechnet. Darin enthalten sind HEXs zwischen Prozessströmen (Wärmerückgewinnung), HEXs zwischen einem Prozessstrom und einer Utility sowie die HEXs 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. Die zwei Speichermedien Wasser und Wärmeträgeröl sind vordefiniert.

In unserem Fallbeispiel betrachten wir einen Schichtspeicher mit Wasser als Speichermedium und verwenden die im Abschnitt Investitionskosten auf Seite 4 definierten Kostenparameter. Öffnen Sie das Register [Economic Data](#) und passen Sie die Kenngrößen gemäss den Vorgaben an. Da es sich um eine bestehende Anlage handelt, können die Investitionskosten für die Utility-HEXs zu Null gesetzt werden.

Der vollständige Datensatz enthält folgende Werte enthalten:

Economic Data | OC Schedule 1 | PinCH Process Guide | Process Stream Table | Utility Stream Table | E-Modules Explorer | Help Details

5 Economic Data The economic data is used throughout the software PinCH for calculating costs associated with an heat exchanger network (HEN), energy conversion units and the

Heat Exchanger Costs i

$C = a + C_b \cdot (A/A_b)^m \cdot f_L$

A = Heat Exchanger Area in m²

Type	Fixed Cost a EUR	Base Cost C _b EUR	f _L	Base Area A _b m ²	Exponent m
Process Heat Exchanger	6000	15'000	5.00	40	0.67
Hot Utility Heat Exchanger	0	0	3.00	100	0.71
Cold Utility Heat Exchanger	0	0	3.00	100	0.71
ISSP Heat Exchanger	6000	15'000	5.00	40	0.67

Storage: Tank Costs i

$C = a + C_b \cdot (V/V_b)^m \cdot f_L$

V = Tank Volume in m³

Storage	Fixed Cost a EUR	Base Cost C _b EUR	f _L	Base Volume V _b m ³	Exponent m	Storage Type
Stratified	0	16'000	3.00	30	0.71	Stratified
FTVM	0	0	3.00	100	0.71	FTVM

Storage: Media Costs and Media Properties i

$C = C_b \cdot m_{sm}$

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	0.001	1000	2'000	4.19
Heat Transfer Oil	0	800	1'000	2.00

Note: Open Circuit Media is handled in the ISSP properties

Amortisation Parameters i

Depreciation Period y

Interest Rate %

Annuity Factor 0.130 1/y

Abbildung 7: Economic Data

Ihr **Project Explorer** hat nun folgenden Aufbau:

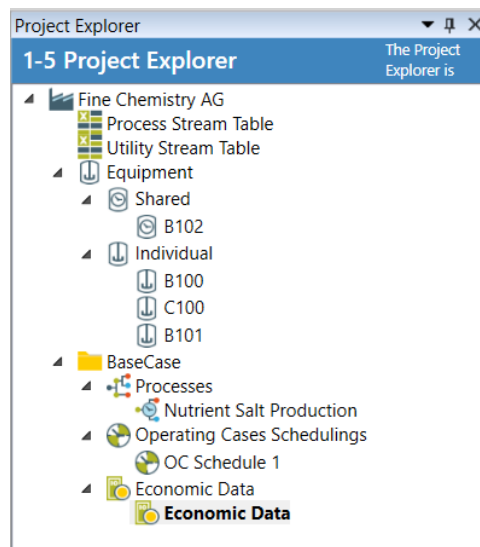


Abbildung 8: Project Explorer



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:

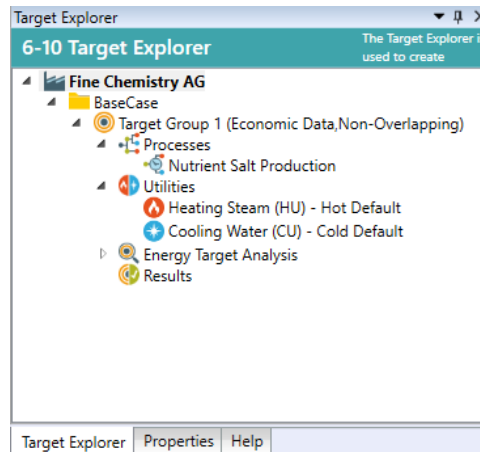


Abbildung 9: Target Explorer

Wenn Sie Probleme mit dem Erstellen der **Target Group** haben, konsultieren Sie bitte **Tutorial 1**. In **Step 6** wird das Vorgehen Schritt für Schritt erklärt.



Step 7: Analyze Energy Targets

Im **Tutorial 3** ist bereits eine detaillierte Analyse der Energy Targets für die direkte und die 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 zeigt.

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 Quellen (Sources) und Senken (Sinks), welche mit Hilfe des Speichers indirekt gekoppelt werden können. Mit den Kontrollkästchen vor den jeweiligen Strömen können diese an- bzw. abgewählt werden.

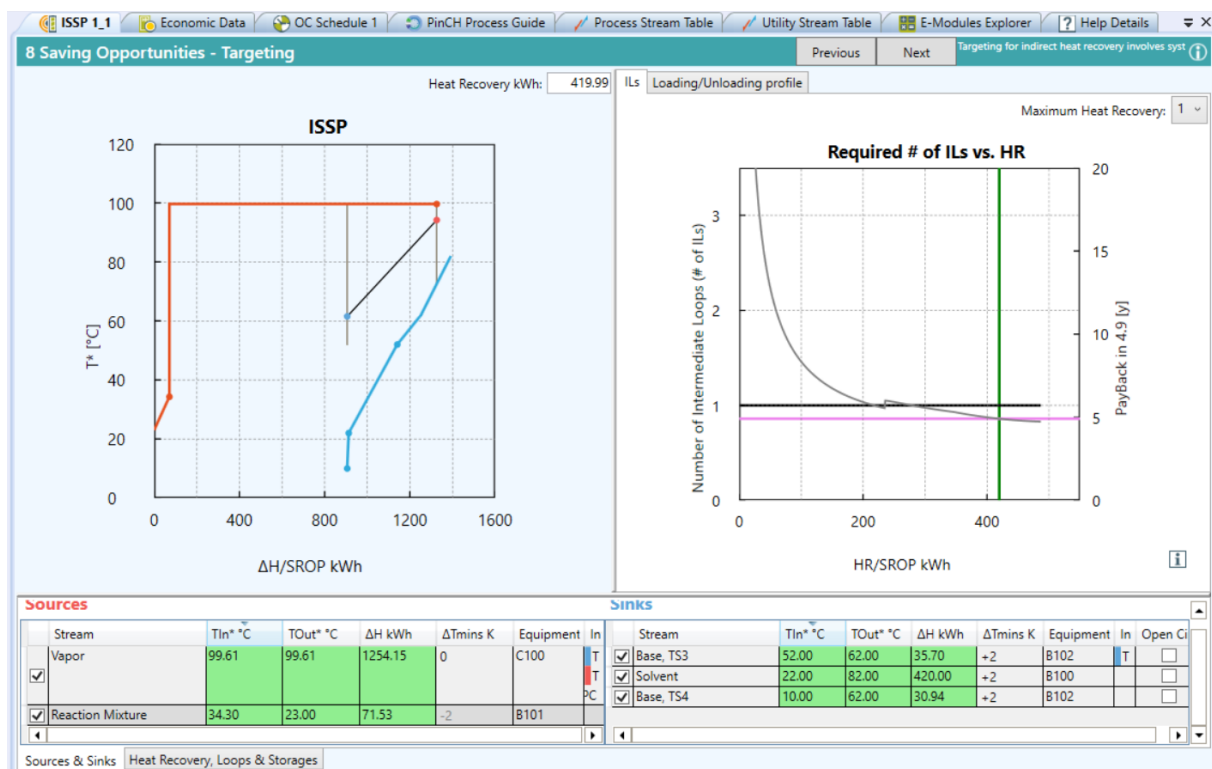


Abbildung 10: ISSP

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 deren Temperaturbereich dargestellt.

Unter [Storage](#) können Sie den Speicher spezifizieren. Als Default ist ein Schichtspeicher mit Wasser als Speichermedium definiert. Die im Register [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 Abbildung 11 ist ein allgemeiner SS mit drei Schichten dargestellt. Zum Beladen werden Hot Streams und zum Entladen Cold Streams verwendet. Das Speichermedium wird über einen Zwischenkreislauf (Intermediate Loop, 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 Prozessströme 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, ist es möglich, dieselbe Energiemenge in einem kleineren Speicher zu speichern.

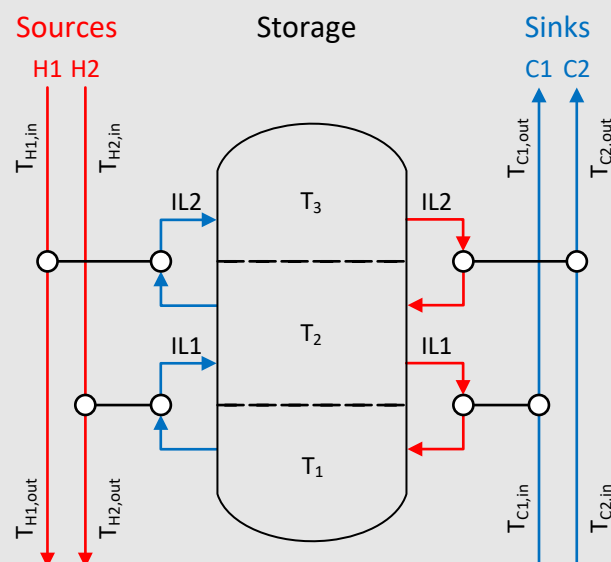


Abbildung 11: Allgemeiner Schichtspeicher mit drei Schichten, zwei ILs, je zwei Sources (Hot Streams H1 und H2) und Sinks (Cold Streams C1 und C2)

Da der Strom Base, TS3 (Cold Stream) mit der verschobenen Eintrittstemperatur $T_{in}^* = 52^\circ\text{C}$ im Vergleich zu den beiden anderen Strömen den IL des Speichers nur bis maximal 52°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. 36 kWh), ab. Ohne diesen Strom kann die untere Schicht nun theoretisch bis auf 22°C abgekühlt 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 der Tabelle unterhalb von **Sinks** in das Kontrollkästchen vor dem Strom Base, TS3.

Klicken Sie in das Kontrollkästchen vor dem Strom Base, TS4.

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

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

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.

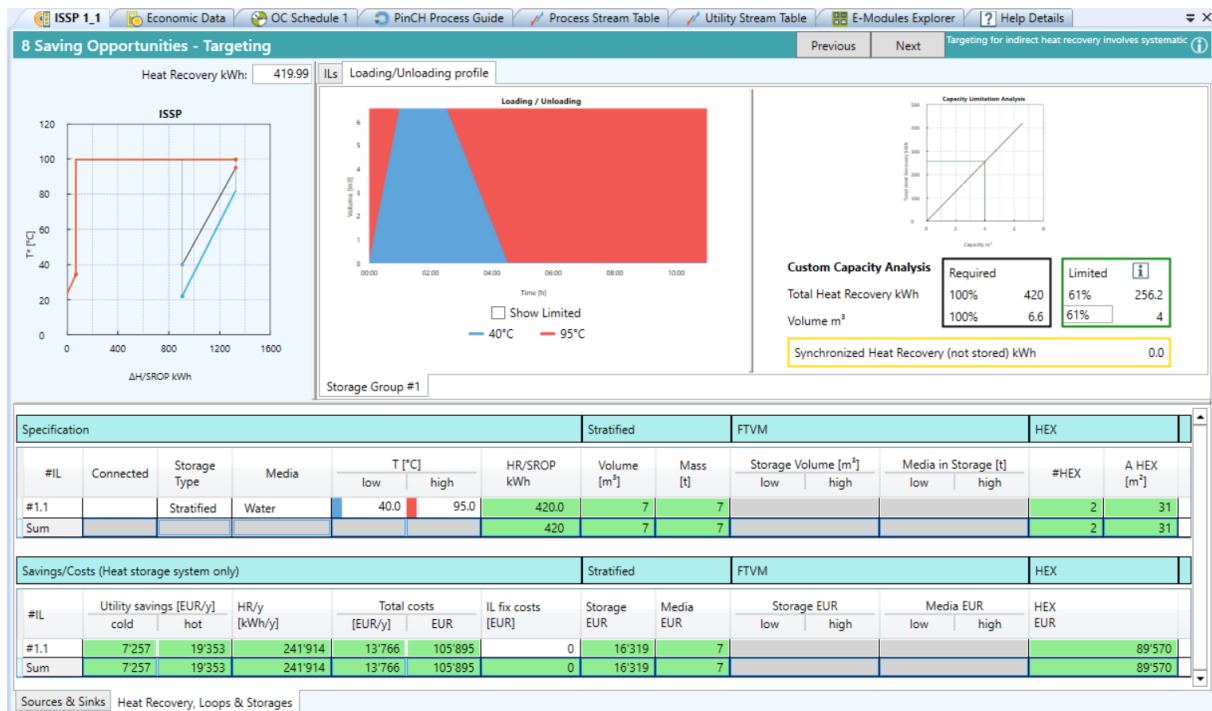


Abbildung 12: ISSP, Loading/Unloading Profile und Capacity Limitation Analysis

Hinweis: Mit der [Custom Capacity Analysis](#) kann berechnet werden, wie viel WRG bei einem Speicher mit einem limitierten Volumen möglich ist. Sie können unterhalb des Graphen im grünen Kasten das Volumen des Speichers definieren und erhalten automatisch Angaben in Prozent und absolut in Kilowattstunden, wie viel WRG möglich ist. Im [Loading/Unloading Profile](#) können Sie durch Klicken auf das Kontrollkästchen [Show Limited](#) zwischen dem unlimitierten und dem limitierten Profil hin- und herschalten. Wie in Abbildung 12 ersichtlich, können in unserem Fall mit einem 4 m³ Speicher 61% des WRG-Potenzials genutzt werden.

In der Tabelle [Savings/Costs \(Heat storage system only\)](#) 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. HEXs 105'900 € 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. In diesem Fallbeispiel liegt jedoch der Fokus auf der Integration eines thermischen Speichers. Daher werden ECUs nicht weiter betrachtet.



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 Verfahrensflussbild, zeigt aber auf, welche Prozessströme in welcher Reihenfolge mittels HEXs 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 Speichertemperaturen 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 direkt 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](#) des HESN können Sie auch Ströme einblenden lassen, welche nicht mit dem Speicher gekoppelt sind (hier: 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 des optimierten Prozesses dargestellt.

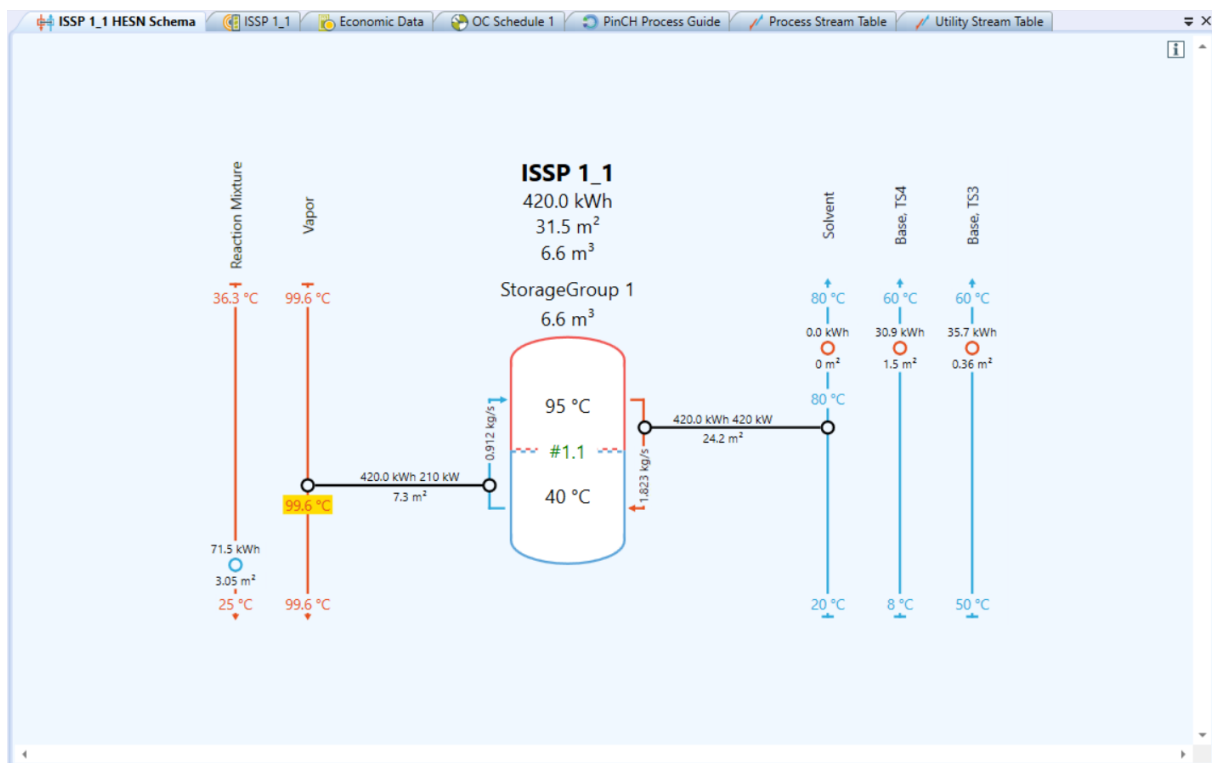


Abbildung 13: HESN des optimierten Prozesses

IV. Optimierter Prozess

In Tutorial 3 ist das Verfahrensfliessbild der Nährsalzproduktion für jeden einzelnen TS dargestellt. Wir übertragen nun das HESN auf das Verfahrensfliessbild. Die Prozessströme, welche durch indirekte WRG abgedeckt werden, sind farbig hervorgehoben. Der Hot Stream Vapor tritt nicht gleichzeitig mit dem Cold Stream Solvent auf. Das Verfahrensfliessbild mit dem integrierten Speicher ist in Abbildung 14 dargestellt.

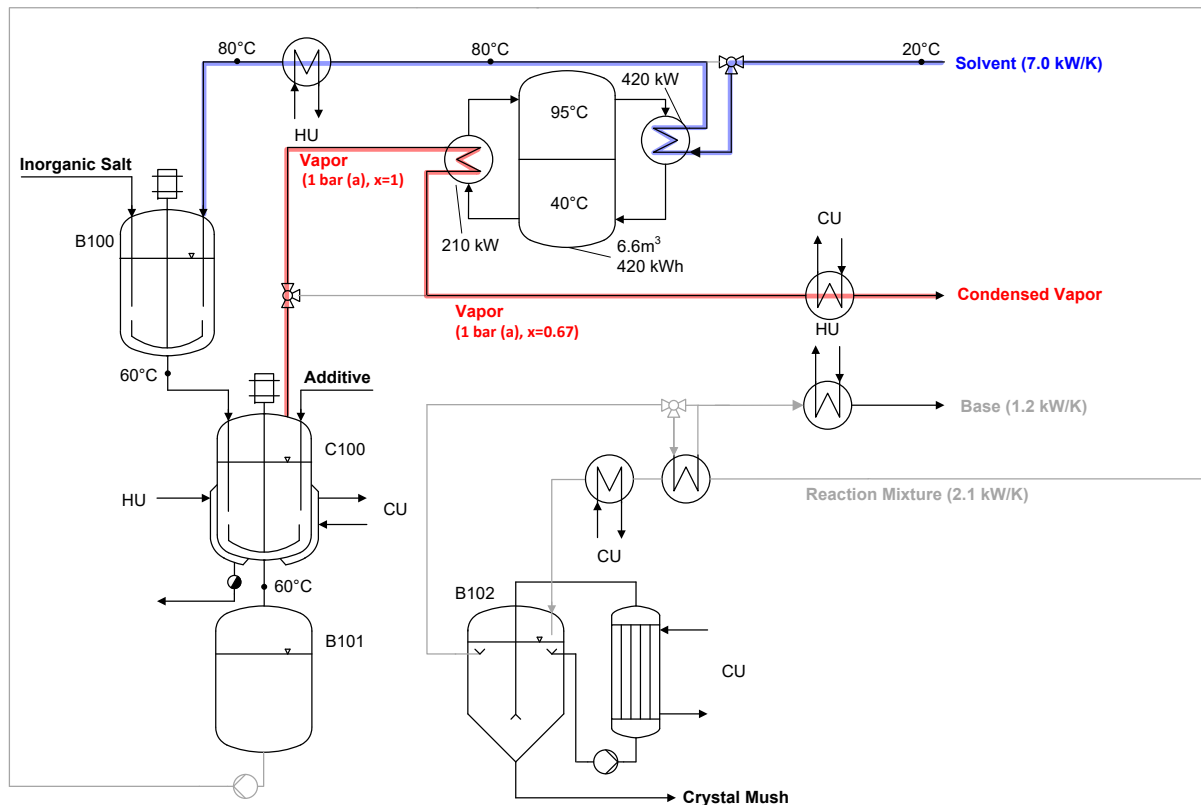


Abbildung 14: Verfahrensfliessbild der Nährsalzproduktion mit integriertem thermischem Energiespeicher

Mit der Integration des Speichers können die benötigten Utilities reduziert werden. Das installierte Speichersystem verursacht Investitionskosten von 105'900 €. Diese werden über 10 Jahre abgeschrieben und dadurch entstehen jährliche Investitionskosten von 13'770 €. In Tabelle 2 sind die Kosten und der Energiebedarf des Prozesses aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass mittels direkter- und indirekter WRG die Betriebskosten um 66 % reduziert werden können. Während den ersten 5 Jahren reduzieren sich die jährlichen Gesamtkosten damit um 32 %. Nach den zehn Jahren ist die Investition abgeschrieben und die Gesamtkosten entsprechen dann den Betriebskosten. Über einen Zeitraum von zehn Jahren kann mit diesen Massnahmen 174'200 € eingespart werden.

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

	HU	CU	Betriebskosten	Jährl. Inv. Kosten	Jährl. Gesamtkosten
	[MWh/a]	[MWh/a]	C_{Op} [€/a]	$A \cdot C_{Inv}$ [€/a]	C_{tot} [€/a]
Ausgangslage	368	849	54'900	0	54'900
Direkte WRG	281	763	45'343	4'977	50'320
Direkte & Indirekte WRG	39	521	18'733	18'743	37'476
Einsparung	329	328	36'167	-18'743	17'424

Vielen Dank für Ihre Zeit!

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