



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Bereich Prozess- und Betriebsoptimierung

In Zusammenarbeit mit der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW)

Pinch-Pilot II – Erprobung Pinchlight

Projekt: Ramseier AG

SCHLUSSBERICHT

Ausgearbeitet durch

Thomas Grieder, DM Energieberatung AG

Paradiesstrasse 5, 5200 Brugg, thomas.grieder@dmeag.ch, www.dmeag.ch

Mitarbeit durch

Georg Hafner, Helbling Beratung + Bauplanung AG

Impressum

Datum: 11. Oktober 2010

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Bereich Prozess- und Betriebsoptimierung Industrie und Dienstleistungen

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, martin.stettler@bfe.admin.ch

Projektnummer: 102'711

Bezugsort der Publikation: www.bfe.admin.ch

unter EnergieSchweiz - Unternehmen – Prozessintegration PI

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Ziele	4
2	Vorgehen	4
3	Prozessbeschreibung	5
3.1	Allgemeine Betriebsdaten	5
3.2	Prozessschritte	6
3.3	Nebenprozesse	11
3.4	Verbrauchszahlen	13
3.5	Vergleichswerte	13
4	Modellierung der Energie- und Masseströme.....	14
4.1	Berechnungstabellen	14
4.2	Energieflussdiagramme	15
5	Full-Pinch Analyse	16
5.1	Energie- und Masseströme.....	16
5.2	Composite Curve	17
5.3	Kostenkurve	17
5.4	Wärmetauscher-Netzwerk	19
6	Pinch-Light Module	20
6.1	Modul Sprühbad.....	21
6.2	Metalltrockner	21
6.3	Einbrennofen.....	21
6.4	Produktkühlung im Gegenstromprinzip.....	22
6.5	Resultate der Modellierung	22
7	Vergleich der Analysen.....	26
8	Massnahmen neue Anlage	26
9	Fazit und Empfehlung.....	28
10	Literaturverzeichnis.....	29
11	Anhangsverzeichnis.....	29

1 Ausgangslage und Ziele

Das Bundesamt für Energie (BFE) startete im Herbst 2008 eine Kampagne zur Förderung der Pinch-Methode in der Schweizer Industrie. Neun Industrieunternehmen aus unterschiedlichen Branchen wurden für ein Pilotprojekt ausgewählt. Dazu gehört auch die Firma Ramseier in Rubigen. Ramseier ist ein Thermobeschichtungsbetrieb spezialisiert auf die Beschichtung von Fenstern, Fassadenelemente und ähnlichem.

Bei der Thermobeschichtung werden die zu beschichtenden Metallteile mehrfach aufgeheizt und wieder abgekühlt. In der chemischen Vorbehandlung werden Bäder beheizt und das an den Teilen anhaftende Wasser wird in einem Ofen verdunstet. Das Potenzial für Abwärmenutzung und somit der Nutzen einer Pinch-Analyse scheint auf Anhieb gross zu sein. Erschwerend ist allerdings der Batch-Charakter der Anlage, es handelt sich nicht um einen kontinuierlichen Prozess. Zudem eignen sich die zu beschichtenden Metallteile schlecht für eine Abwärmenutzung. Kontinuierliche Flüssigkeits- und Gasströme sind für diesen Zweck besser geeignet.

Ziel des Projektes war die Entwicklung von branchenspezifischen Prozess-Modulen in einem eigens zu entwickelnden Software-Tool. Das Tool wurde von der EPF Lausanne erstellt. Die Aufgabe der DM Energieberatung AG bestand darin, die Prozessschritte zu erfassen, und die relevanten Energie- und Masseströme zu bestimmen.

In einem weiteren Schritt sollte unter Anwendung dieser Prozess-Module das energetische Optimierungspotenzial bestimmt werden. Dazu gehört der Entwurf eines Wärmetauscher-Netzwerkes zur Rückführung der anfallenden Abwärme in den Prozess. Zudem war eine Massnahmenliste mit Abschätzung der Wirkung jedes Wärmetauschers und dessen Wirtschaftlichkeit zu erstellen.

2 Vorgehen

In mehreren Begehungen wurden die thermisch relevanten Prozesse erfasst und die Materialströme so gut wie möglich quantifiziert. Daraus wurde ein Prozessschema erstellt, das als Spezifikation für die Erstellung der Module durch die EPFL diente.

In mehreren Besprechungs- und Testrunden wurden die einzelnen Module verfeinert und im Detail weiter spezifiziert. Es erwies sich als zweckmässig, die Energie- und Masseströme auch ausserhalb des Software-Tools in Form einer Excel-Spreadsheets detailliert zu berechnen. Mit diesen Daten konnte auch ein Energieflussdiagramm (Sankey-Diagramm) erstellt werden.

Da sich die Fertigstellung der Module stark verzögerte wurde im Dezember 2009 von der Firma Helbing Beratung + Bauplanung AG eine konventionelle Pinch-Analyse durchgeführt. Diese stützte sich stark auf die zuvor berechneten Energie- und Masseströme ab. Die Pinch-Analyse zeigt ein gewisses Einsparpotenzial auf und schlägt ein Wärmetauscher-Netzwerk vor.

Im Frühling 2010 konnten auch die Software-Module noch endgültig getestet werden. In diesen Modulen sind zum Teil andere Energie- und Masseströme berücksichtigt, als in der konventionellen Pinch-Analyse. Dementsprechend gibt es Abweichungen bei den Resultaten. Diese Abweichungen werden im Bericht kommentiert. Die Erkenntnisse aus der Arbeit mit den Prozessmodulen führten auch dazu, dass einzelne Masseströme aus der konventionellen Pinch-Analyse neu gewichtet wurden. Die Berechnung mit dem sogenannten Pinch-Leni-Tool wurde mit den neuen Daten wiederholt.

Alle bisher genannten Arbeiten bezogen sich auf die bestehende Beschichtungsanlage der Firma Ramseier. Bis 2011 wird diese Anlage abgebrochen und durch einen Neubau ersetzt. Daher wurde auf die Erstellung eines Massnahmenplanes für die alte Anlage verzichtet. Die Analyse der alten Anlage hat aber wertvolle Hinweise geliefert, wie die neue Anlage energieeffizienter gebaut werden kann. Die in das Anlagenkonzept eingeflossenen Anregungen werden hier ebenfalls beschrieben.

3 Prozessbeschreibung

Die Ramseier Rubigen AG beschichtet Eingangsfronten, Brandschutztüren, Geländerelemente und Maschinenteile aus Stahl oder Teile aus Aluminium wie Fassadenbleche, Fenster, Wintergärten, Jalousieläden bis zu Vorhangschienen und Beleuchtungskörpern.

Die Beschichtung der Teile erfolgt im Batch-Betrieb. Die an 7 Meter langen Trägern aufgehängten Teile durchfahren verschiedene Teilprozesse, wobei der Vorschub in einem festen zeitlichen Takt erfolgt. Zwischen jedem Vorschub verweilen die Teile für eine gewisse Zeit beim entsprechenden Prozessschritt. Andere Phasen (z.B. Einbrennofen) verfügen über „Parkplätze“ für mehrere Träger, so dass die Verweilzeit auf bis zu 6 Taktzyklen verlängert werden kann.

Ein vollständiges Prozessschema ist im Anhang 1 enthalten. Im Abschnitt 0 ist der Prozess Schritt für Schritt beschrieben und die Schemata der Teilprozesse sind in den Text integriert.

3.1 Allgemeine Betriebsdaten

Arbeitszeit	4'950 h/a	
Maschinenlaufzeit	4'000 h/a	
beschichtete Fläche	1'050'000 m ² /a	
	davon Automat	90% (945'000 m ² /a)
	davon Hand	10% (105'000 m ² /a)
	Beschichtung mit 80 g Lack pro m ²	
Masse Total	7'500 to/a	
	Masse Produkte	4'500 to/a
	Masse Träger	3'000 to/a

3.2 Prozessschritte

3.2.1 Schritt 1 – Beladen



Abbildung 3-1 Aufhängen der Teile

Die zu beschichtenden Teile werden an 7 Meter langen Trägern, den Gehängen, aufgehängt. Die Teile kommen normalerweise aus einem Zwischenlager und haben Raumtemperatur, also ca. 25°C. Es kommt selten vor, dass Teile im Winter direkt vom LKW geladen und aufgehängt werden.

3.2.2 Schritt 2 – Vorbehandlung

Zone 0 „Entfetten“



Abbildung 3-2 Entfettungsbad mit Wärmetauscher

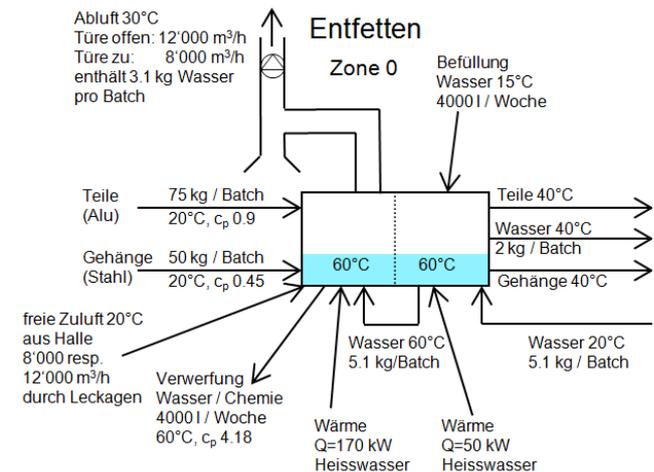


Abbildung 3-3 Masseflüsse und Temperaturen für Zone 0

In der Zone 0 werden die Teile durch Besprühen mit 60°C heisser Lauge entfettet und angeätzt. Für Stahl und Aluminium kommen zwei unterschiedlich starke Laugen zum Einsatz. Dazu ist das Bad in eine hintere Zone mit kleinerem pH-Wert und eine vordere mit höherem Wert unterteilt. In der Kammer selbst sind für jede Lauge getrennte Sprühkränze vorhanden.

Die Teile und Gehänge verschleppen eine gewisse Menge der Lauge in das nachfolgende Spülbad. Von dort wird das Bad mit frischem Wasser wieder ergänzt, zuerst in die hintere Kammer und von dort in die vordere.

Das chemisch angereicherte und mit dem Abtrag vermischte Bad von 4 Kubikmeter Inhalt wird am Freitagabend bei Produktionsende entleert und am Samstag mit aufbereiteter Lauge nachgefüllt.

Eine Erhöhung der Wassertemperatur auf über 60°C würde den Prozess beschleunigen und hätte einen positiven Einfluss auf den Entfettungsprozess. Bei tieferen Temperaturen ist das Gegenteil der Fall.

Beim Besprühen entsteht Wasserdampf, der kontinuierlich abgesaugt werden muss. Durch das Absaugen wird vermieden, dass der Dampf sich in der Halle an Teilen oder der Anlage niederschlägt und kondensiert. Andererseits kann damit die Durchlaufzeit beschleunigt werden.

Bei geschlossenen Türen läuft die Lüftung auf Stufe 1, da der Wasserdampf sonst durch Leckagen entweicht. Es entsteht ein geringer Unterdruck in der Kabine. Mit dem Öffnen der Türe schaltet die Lüftung auf Stufe 2 um den entweichenden Dampf abzusaugen.

Zone 1 „Spülen“

In der Zone 1 werden die Teile mit Frischwasser abgesprüht. Da mit jedem Batch Wasser aus dem Entfettungsbad verschleppt wird, muss das Spülbad kontinuierlich erneuert werden.

Das Spülwasser wird weder beheizt, noch gekühlt.

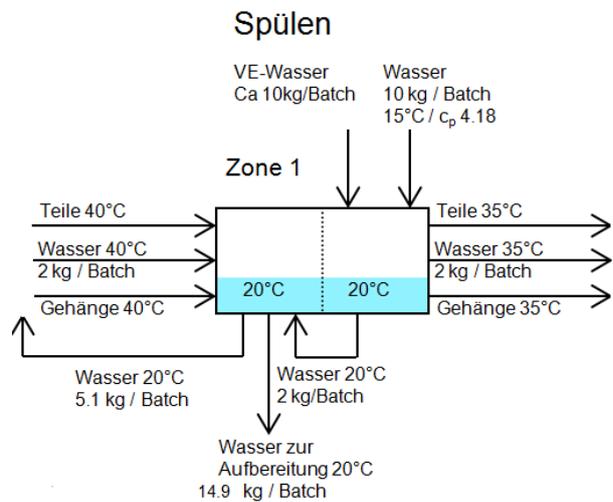


Abbildung 3-4 Masseflüsse und Temperaturen für Zone 1

Zone 2 „Chromatieren“

In der Zone 2 wird das Aluminium mit einer sauren Lösung chromatiert ($0,6 \text{ g/m}^2$).

Dieses Bad ist ebenfalls auf 60°C beheizt und wird aus dem nachfolgenden zweiten Spülbad ergänzt. Alle 3 Monate wird der Inhalt des Bades vollständig ersetzt.

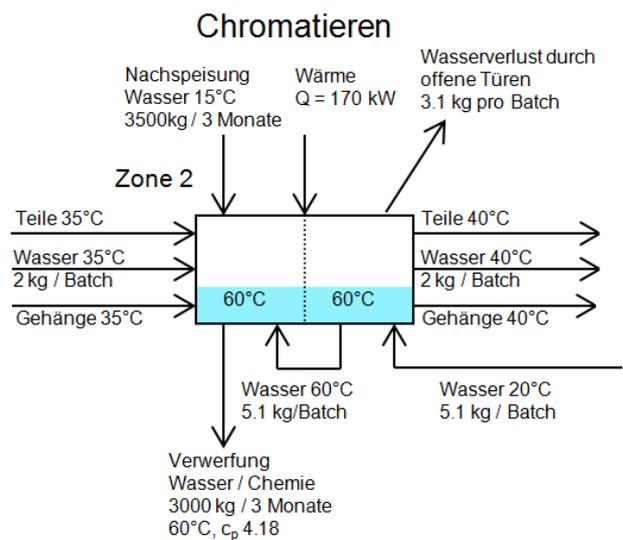


Abbildung 3-5 Masseflüsse und Temperaturen für Zone 2

Zone 3 „Spülen“

Zweifaches Spülen mit Kaltwasser und abschliessende Auslaufspülung mit entmineralisiertem Wasser.

Auch dieses Spülbad wird weder beheizt, noch gekühlt.

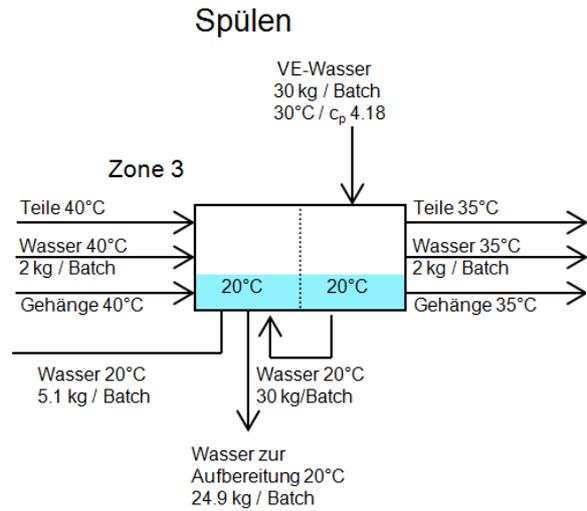


Abbildung 3-6 Masseflüsse und Temperaturen für Zone 3

3.2.3 Schritt 3 – Haftwassertrocknung



Abbildung 3-7 Haftwassertrockner

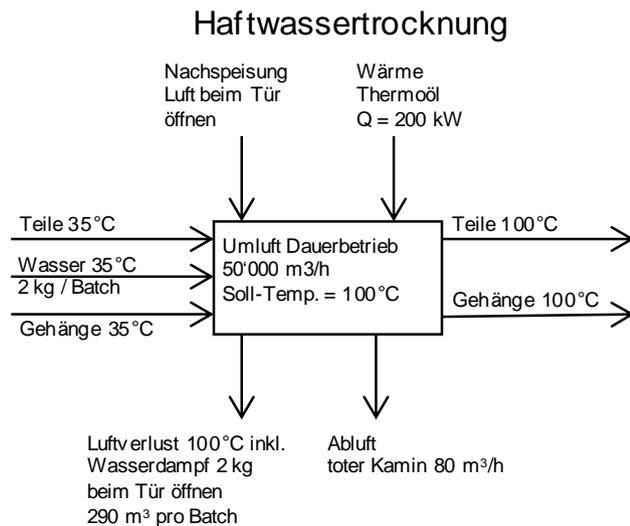


Abbildung 3-8 Masseflüsse und Temperaturen für den Haftwassertrockner

Im Haftwassertrockner wird das verschleppte Spülwasser aus dem letzten Bad verdunstet. Die Gehänge werden im Innern des Ofens seitlich verschoben und verweilen 6 Takte im Ofen. Pro Gehänge werden ca. 2 kg Wasser verdampft.

Der Trockner hat zwei Türen auf derselben Stirnseite. Es sind nie beide Türen gleichzeitig geöffnet. Die Eingangstüre wird geöffnet und ein Gehänge fährt hinein. Danach öffnet die Ausgangstüre und ein getrocknetes Gehänge fährt heraus.

Bei geöffneten und geschlossenen Türen ist ein Umluftventilator dauernd in Betrieb. Der Ventilator ist zwischen den beiden Türen angeordnet und bläst heisse Luft in die Kabine hinein. Die heisse Luft wird am hinteren Ende der Kabine durch einen Luftkanal angesaugt und über einen mit Thermoöl beheizten Lifterhitzer geführt. Durch den Überdruck im Trockner entweicht bei der Türöffnung warme Luft im oberen Bereich der Türe, im unteren Bereich strömt Hallenluft hinein.

Es wurde nie ausprobiert, den Ventilator bei geöffneten Türen abzustellen. Man ist der Meinung, dass dann die Temperatur zu stark abfällt.

Der Haftwassertrockner hat keine Zu- und Abluftanlagen. Es gibt einen nicht benutzten Kamin, durch den über natürliche Konvektion Wärme verloren geht. Der Kamin ist mit einem Schieber geschlossen.

3.2.4 Schritt 4 – Auskühlstrecke



Abbildung 3-9 Auskühlzone

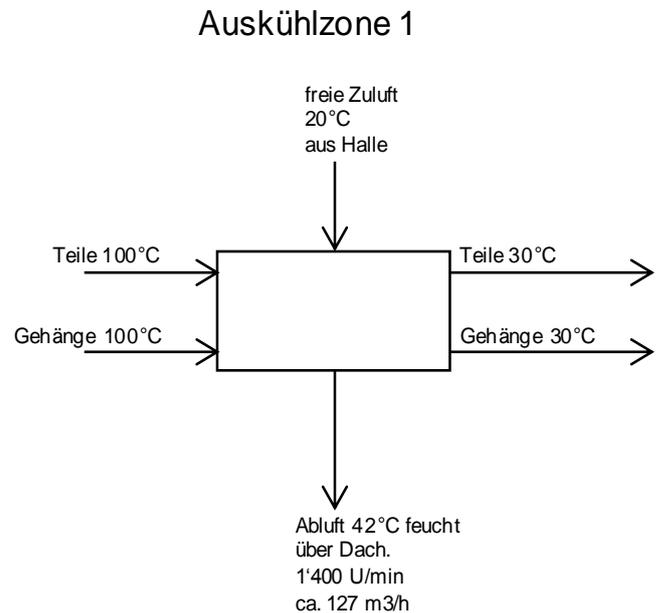


Abbildung 3-10 Masseflüsse und Temperaturen für die erste Auskühlzone

Die getrockneten Gehänge werden entlang der Vorbehandlung wieder nach vorne in die Pufferzone transportiert und kühlen dabei auf Umgebungstemperatur ab. Ein Abluftventilator führt die erwärmte Luft über Dach an die Umgebung ab.

3.2.5 Schritt 5 – Beschichtung

In der Beschichtungskabine werden die Teile mit dem Lack-Pulver besprüht. Damit das Pulver an den Teilen haftet, werden diese gegenüber der Spritzpistole elektrostatisch aufgeladen. Die elektrische Energie für die Aufladung ist gering und wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Überschüssiges Pulver darf nicht in die Halle gelangen. Daher werden die Pulverkabinen mit Abluftventilatoren entlüftet. Die Luft wird über Dach an die Umgebung abgegeben.



Abbildung 3-11 automatische Pulverbeschichtung

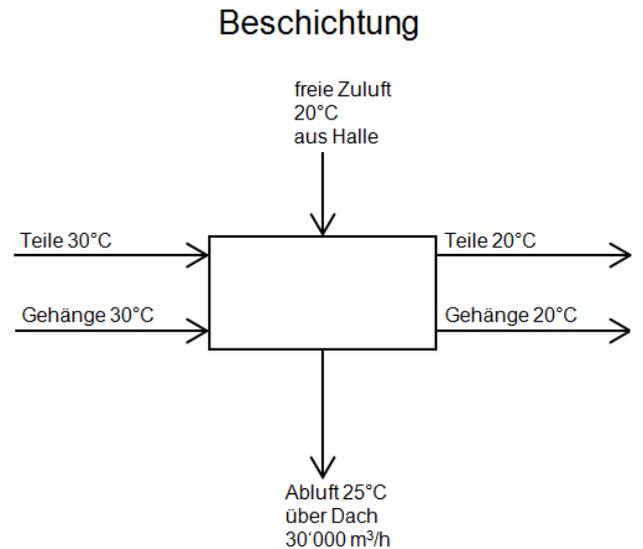


Abbildung 3-12 Masseflüsse und Temperaturen für die Beschichtung

3.2.6 Schritt 6 – Angelierzone und Einbrennofen



Abbildung 3-13 Einbrennofen

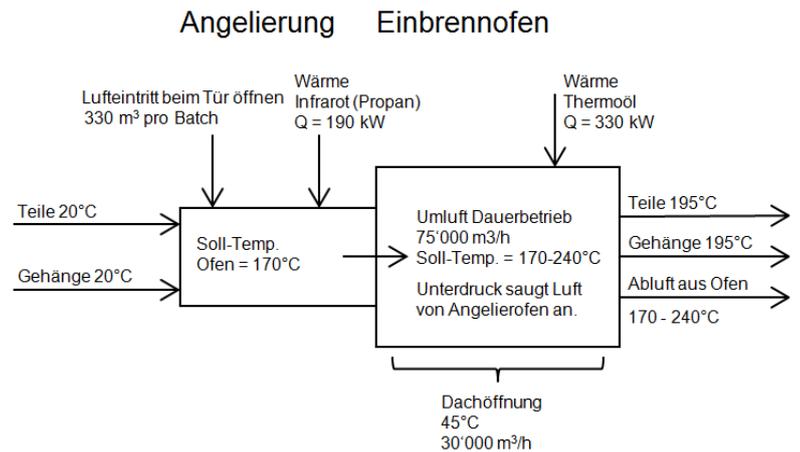


Abbildung 3-14 Masseflüsse und Temperaturen für den Einbrennofen und die Angelierung

Im Einbrennofen wird der Lack verflüssigt und auf eine Temperatur von 170°C bis 240°C erwärmt. Bei diesen Temperaturen findet ein chemischer Prozess statt und der Lack härtet aus (z.B. Reaktion von Harz und Härter bei Epoxidharz-Beschichtung).

In einem ersten Schritt wird das Pulver in einem Propangas beheizten Ofen angeliert. Dadurch wird verhindert, dass das Pulver durch die starke Umluft im eigentlichen Einbrennofen weggeblasen wird. Zudem verringert sich die Verweilzeit im Einbrennofen. Der Prozess läuft wie folgt ab:

- ab 70°C angelieren, Beginn des Schmelzprozesses
- ab 100°C Schmelztemperatur, Pulver verflüssigt sich
- ab 180°C Beginn chemische Vernetzung, dauernde Veränderung

Träger und Teile bleiben je nach Materialdicke ca. 20s in der Angelierzone. In dieser Zeit wird das Pulver auf 170°C erwärmt und verflüssigt.

Die vom Angelierofen benötigte Wärme wird als Infrarotwärme mit Propanbrennern zugeführt.

Nach der Angelierung fahren die Träger direkt weiter in den Einbrennofen. Erst dort werden auch Träger und Teile auf mindestens 180°C erhitzt. Die Aufheizzeit beträgt pro Millimeter Materialdicke 4 - 5 Minuten.

Bei 180°C beginnt die chemische Vernetzung. Die Einbrennphase dauert ca. 4 – 6 Zyklen und darf nicht zu früh abgebrochen werden.

Ein Umluft-Ventilator im Ofen ist dauernd in Betrieb (Umluftbetrieb 75'000 m³/h). Der Einbrennofen bezieht Luft aus der Angelierzone (1'200 m³/h) und erhitzt sie mit einem thermoölbeheizten Wärmetauscher auf die gewünscht Temperatur. Aus dem Ofen entweicht heisse Luft an die Umgebung durch Ritzen und Spalten und nach dem Einbrennprozess durch die geöffnete Türe.

Die Teile verlassen den Ofen mit einer Oberflächentemperatur von gemessenen 195°C.

3.2.7 Schritt 7 – Auskühlzone

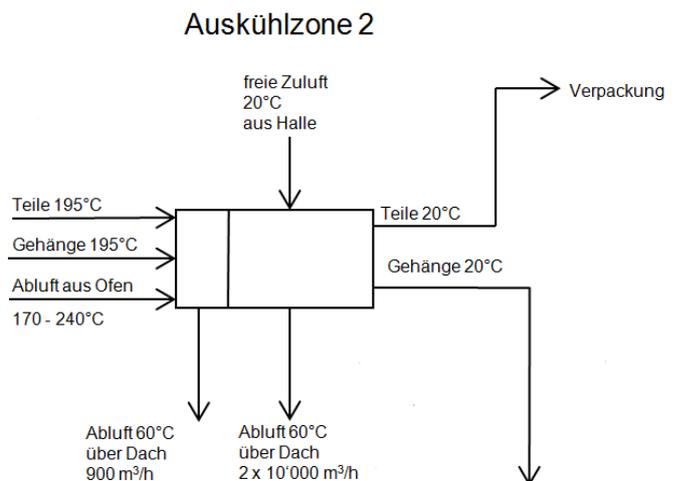


Abbildung 3-15 Auskühlkabine

Abbildung 3-16 Masseflüsse und Temperaturen für die Auskühlkabine

Nach dem Verlassen des Einbrennofens verweilen die heißen Teile und Gehänge für einen Taktzyklus in einer geschlossenen Abkühlkabine. Sie kühlen während diese Zeit auf 120°C bis 170°C aus. Die Luft aus der Abkühlkabine wird über einen Abluftventilator an die Umgebung abgeführt.

Anschliessend an die Auskühlkabine bleiben die Gehänge noch mehrere Zyklen in der Halle und kühlen dort auf die Temperatur der Hallenluft aus.

3.3 Nebenprozesse

3.3.1 Abbrennofen

Beim eigentlichen Beschichten werden die Teile elektrostatisch aufgeladen. Die Kontaktierung erfolgt dabei über die Träger, die mit den Teilen in einem metallischen Kontakt stehen. Nach dem Einbrennvorgang sind die Träger aber ebenfalls lackiert und müssen vor dem nächsten Durchgang vom Lack befreit werden. Dies geschieht in einem separaten Abbrennofen, der mit zwei Heizöl-Brennern ausgestattet ist.

Mit dem ersten Brenner werden die Träger während drei Stunden erhitzt, bis sich der Lack entzündet. Durch die Verbrennungswärme des Lacks steigt die Temperatur im Ofen weiter an. Der erste Brenner wird ausgeschaltet und die Ofentemperatur wird durch Einspritzen von Wasser geregelt.

Im oberen Teil des Ofens werden die entstehenden Dämpfe und Abgase nachverbrannt. Dazu dient der zweite Brenner, der während dem Abbrennen dauernd in Betrieb bleibt.

Der Heizölverbrauch des Abbrennofens wurde über sechs Monate mit einem Ölzähler erfasst und beträgt hochgerechnet auf ein Jahr rund 85'000 Liter.

3.3.2 Handkabinen



Abbildung 3-17 Nasslackierzelle

Neben der automatischen Beschichtungsanlage sind drei weitere Hand-Beschichtungszellen vorhanden. Hier werden übergrosse oder kompliziert geformte Einzelstücke beschichtet.

Zwei Kabinen sind für Pulverbeschichtung ausgerüstet und verfügen über je einen Abluftventilator mit 3 kW elektrischer Leistung. Die Kabinen sind rund 1'500 Stunden pro Jahr in Betrieb.

Die dritte Kabine ist für die Nasslackierung vorgesehen. Hier ist ein Umluftventilator mit 25 kW Leistung eingebaut.

3.3.3 Nebenofen

Angebaut an den Einbrennofen ist ein Nebenofen für Übergrößen aus der Handbeschichtung. Die Abmessungen betragen 3 m x 5 m x 3 m. Der Nebenofen wird mit Thermoöl beheizt und verfügt über einen Umluftventilator mit einer Leistung von 25'000 m³/h.

Die Heizleistung beträgt 100 kW. Bei geschätzten 2'000 Vollbetriebsstunden ergibt sich ein Verbrauch von 200 MWh pro Jahr.

3.3.4 Wasseraufbereitung

In der Wasseraufbereitung wird die Verwerfung aus dem Entfettungs- und dem Chromatierbad gefiltert und an die Bäder zurückgegeben.

Die Filter selbst müssen einmal wöchentlich gereinigt werden. Anschliessend wird das Wasser aus der Filterreinigung in einem Vakuum-Destillationsapparat wieder aufbereitet. Auch die Verwerfung aus dem Spülbad wird einmal wöchentlich destilliert. Das so entmineralisierte Wasser wird dem letzten Spülbad zugegeben.

Der Destimat ist elektrisch beheizt und wird in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Die Leistungsaufnahme beträgt 70 kWh/m³ Destillat bei einer Kapazität von 180 Liter Destillat pro Stunde. Die Laufzeit wird mit 19 Stunden pro Tag an 7 Tagen pro Woche angegeben. Das ergibt bei 48 Wochen Arbeitszeit eine Laufzeit von 6'400 Stunden pro Jahr und einen Strombezug von 80 MWh.

3.4 Verbrauchszahlen

Die Verbrauchszahlen für das Jahr 2007 sind wie folgt:

- | | | |
|----------------|----------------------|-----------|
| • Heizöl | 764'076 Liter resp. | 7'641 MWh |
| • Propangas | 49 Tonnen, resp. | 629 MWh |
| • Elektrizität | 1'868'000 kWh, resp. | 1'868 MWh |

Von den 7'641 MWh Heizöl werden 817 MWh an einen Nahwärmeverbund abgegeben und geschätzte 230 MWh werden für die Beheizung der betriebseigenen Gebäude benötigt. Somit ergibt sich ein Verbrauch für den Beschichtungsprozess von 7'223 MWh (inkl. Propan).

Wärmezähler für die einzelnen Prozessschritte sind nicht vorhanden.

Bezogen auf die totale beschichtete Fläche resp. das totale Gewicht der beschichteten Teile ergeben sich spezifische Verbrauchswerte von:

- | | |
|----------------------------------|------------------------|
| • flächenspezifischer Verbrauch | 6,9 kWh/m ² |
| • gewichtsspezifischer Verbrauch | 1,6 kWh/kg |

3.5 Vergleichswerte

3.5.1 Beispiel 1 aus Gloor (1996)

- 500'000 Flachwaren pro Jahr, maximale Abmessungen 2 m x 0,8 m x 0,1 m, Gewicht 6 kg, Oberfläche 0,6 m²
- Kettenförderer mit 2 m/min, Laufzeit 2'000 h/a
- Durchsatz 3'000 Tonnen pro Jahr, 300'000 m² pro Jahr, entspricht 150 m²/h, 1'500 kg/h

Benötigte Heizleistungen:

- Vorbehandlung (inkl. Trockner) Heizleistung 400 kW, Verbrauch 800 MWh pro Jahr, Anteil am Gesamtverbrauch 60%
- Einbrennofen 250 kW Heizleistung, Verbrauch 500 MWh pro Jahr, Anteil 40%

Spezifische Verbrauchswerte:

- | | |
|----------------------------------|------------------------|
| ▪ flächenspezifischer Verbrauch | 4,3 kWh/m ² |
| ▪ gewichtsspezifischer Verbrauch | 0,43 kWh/kg |

3.5.2 Beispiel 2 aus Gloor (1996)

- Anlagen-Kapazität 120 m²/h resp. 1'000 kg/h:
- Chemische Vorbehandlung mit Heizleistung 250 kW entsprechend 50% der totalen Leistung
- Haftwassertrocknung mit 100 kW, resp. 20% der totalen Leistung
- Einbrennofen mit 150 kW, resp. 30% der totalen Leistung

Spezifische Verbrauchswerte:

- | | |
|----------------------------------|------------------------|
| ▪ flächenspezifischer Verbrauch | 4,2 kWh/m ² |
| ▪ gewichtsspezifischer Verbrauch | 0,5 kWh/kg |

3.5.3 Richtwerte des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2006):

- Vorbehandlung (inkl. Haftwassertrockner) 1,7 kWh/m²
- Einbrennofen 1,6 kWh/m²

Spezifischer Verbrauch total:

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| ▪ flächenspezifischer Verbrauch | 3,3 kWh/m ² |
|---------------------------------|------------------------|

4 Modellierung der Energie- und Masseströme

4.1 Berechnungstabellen

Basierend auf dem Prozessschema und den ergänzenden Daten aus Abschnitt 0 wurden die Energieströme einzeln berechnet. Die Resultate der Berechnung sind im Anhang 3 dokumentiert.

Die meisten Energieströme ergeben sich aus einfachen physikalischen Berechnungen. Meistens wird Wasser, Metall oder Luft aufgeheizt resp. abgekühlt. Die Leistungen und Energiemengen ergeben sich aus spezifischen Wärmekapazität der Medien und den Masseflüssen.

Wärmezähler für einzelne Prozesse sind nicht vorhanden. Nur beim Angelierofen ergibt sich der Verbrauch des Ofens direkt aus dem Propangasverbrauch der Firma, da keine anderen Bezüger vorhanden sind.

Zwei Arten von Wärmeströmen waren aufwändiger zu berechnen und sind im Folgenden beschrieben.

4.1.1 Wasserverlust in der Vorbehandlung

Bei der Erarbeitung der Software-Module stellte sich heraus, dass die Vorgänge beim Besprühen der Teile nicht einfach zu modellieren sind. Beim Sprühvorgang selbst ist die Lauge im flüssigen Zustand. Durch das Versprühen erhöht sich die Oberfläche des Wassers stark und ein Teil der Flüssigkeit verdunstet. Die benötigte Verdunstungswärme wird dem Sprühtunnel entzogen, der Schwaden kühlt ab.

In der Zone 0 wird der Schwaden mit dem Abluftventilator abgesaugt, in der Zone 2 entweicht er beim Öffnen der Türen. Zur Berechnung des Wasserverlustes wurde vereinfachend angenommen, dass pro Batch das Volumen des Sprühtunnels einmal mit Schwaden gefüllt und über die Ventilation resp. die offenen Türen abgeführt wird. Bei einem Volumen von 54 m^3 und einer relativen Feuchtigkeit von 60% ergibt sich ein Wasserverlust von 3,1 Liter pro Batch. Dieser Wert ist plausibel und stimmt mit den zu- und abgeführten Wassermengen aus der Vorbehandlung überein.

Der Energieinhalt des abgeführten Schwadens wurde mit dem hx-Diagramm bestimmt:

- | | |
|---|---------------------|
| • Luft im Sprühtunnel: 55°C, 60% Feuchtigkeit | Enthalpie 212 kJ/kg |
| • Hallenluft: 20°C, 30% Feuchtigkeit | Enthalpie 30 kJ/kg |
| • Differenz | 182 kJ/kg |

Somit ergibt sich ein Wärmeverlust von 9,85 MJ pro Batch oder eine mittlere Verlustleistung von 41 kW durch den abgeführten Wasserdampf.

4.1.2 Wärmeverlust durch offene Türen

Beim Öffnen der Türen entweichen grosse Mengen an heisser Luft in die Halle. Dies gilt insbesondere beim Einbrennofen und beim Haftwassertrockner, aber auch bei der Vorbehandlung ist der Effekt nicht unwesentlich.

Der Wärmeverlust durch das Abführen von feuchten Schwaden wurde bereits oben beschrieben. Bei der Türöffnung wird nur noch der Anteil des Wärmeverlustes durch trockene Luft berücksichtigt.

Für die Abschätzung wird ein Berechnungsgang gewählt, der im sogenannten Checkup-Tool der Energie-Agentur zur Anwendung kommt, um den Wärmeverlust durch offenstehende Tore zu berechnen. Die verwendeten Formeln sind ebenfalls im Anhang 3 dokumentiert. In den Tabellen im Anhang 3 sind jeweils die Volumenströme aufgeführt, die sich bei offenen Türen ergeben. Die Werte gehen von knapp $4'000 \text{ m}^3/\text{h}$ in der Vorbehandlung bis $15'000 \text{ m}^3/\text{h}$ beim Einbrennofen. Multipliziert mit der Öffnungszeit von 80 Sekunden pro Batch ergeben sich ganz wesentliche Verlustleistungen, die durch die geöffneten Türen verloren gehen:

- | | |
|----------------------|-------------|
| • Vorbehandlung | 2 x 13,6 kW |
| • Haftwassertrockner | 208 kW |
| • Einbrennofen | 280 kW |

4.2 Energieflussdiagramme

Mit den Resultaten der obigen Berechnungen konnte ein Energiefluss- resp. ein sogenanntes Sankey-Diagramm erstellt werden. Das Diagramm wurde in zwei Bereiche unterteilt, die Wärmeerzeugung sowie die Verbraucher. Beide Diagramme sind im Anhang 4 enthalten.

4.2.1 Wärmeerzeugung

Als Brennstoffe wurden im Jahr 2007 7'641 MWh Heizöl und 629 MWh Propan verbraucht.

Das Propangas wird ausschliesslich in der Angelierung verwendet (vgl. Abschnitt 3.2.6.).

Vom Heizöl geht ein Anteil von 800 MWh zum Abbrennofen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Die restlichen 6'841 MWh Heizöl werden im Thermoöl-Kessel verbrannt und erzeugen eine Nutzwärme von 4'497 MWh.

Die Verluste wurden mit 20% Erzeuger- und 15% Verteilverluste angesetzt. Mit diesen Zahlen kann die Energiebilanz zwischen den berechneten Verbrauchswerten der einzelnen Prozessschritte und den zugeführten Brennstoffmengen geschlossen werden. Diese Verlustanteile sind eher hoch angesetzt, angesichts der hohen Vor- und Rücklauftemperaturen des Thermoöls sind die Werte aber plausibel.

Über einen Umformer wird aus dem Thermoöl Heizwasser für die Gebäudeheizung, den Nahwärmeverbund sowie die Vorbehandlung erzeugt. Die Wärme für den Wärmeverbund wird über einen Zähler erfasst und betrug im Jahr 2007 817 MWh. Der Anteil für die Gebäudeheizung wurde über die Energiebezugsfläche abgeschätzt und beträgt 230 MWh.

Der Wärmebedarf für die Vorbehandlung wurde anhand der Leistungen der Teilprozesse berechnet und beträgt 1'018 MWh oder 26% der Prozesswärme (ohne Nebenofen und Abbrennofen).

Der Haftwassertrockner und der Einbrennofen werden direkt mit Thermoöl beheizt. Die benötigten Wärmemengen ergeben sich aus den berechneten Energieströmen der Teilprozesse. Für den Haftwassertrockner ergibt sich ein Wärmebedarf von 1'234 MWh oder 32% der Prozesswärme, für den Einbrennofen 998 MWh oder 26%.

Der Verbrauch der Angelierkammer ergibt sich direkt aus dem Propangasverbrauch und beträgt 629 MWh oder 16% der Prozesswärme. Angelierung und Einbrennofen zusammen benötigen also 42% der Prozesswärme.

4.2.2 Wärmebezug

Die Bezugsseite ergibt sich aus den berechneten Energieströmen aller Teilprozesse.

Auf der linken Seite des Diagramms sind die vier Anlagenteile Vorbehandlung, Haftwassertrockner, Einbrenn- und Abbrennofen dargestellt.

Die resultierenden Abwärmeströme werden zusammengefasst in Wärmeströme, die direkt an die Hallenluft abgegeben werden und solche, die über eine Ablufthaube gefasst sind. Diese gefassten Wärmeströme sind primär für eine Abwärmenutzung geeignet.

Die warme Hallenluft wird zum Teil wieder über eine grosse Lüftungsanlage abgeführt, zum Teil geht sie über offenstehende Oblichter ab. Diese beiden Anteile sind in etwa gleich gross, wobei auch hier der gefasste Anteil eher wieder in den Prozess zurückgeführt werden kann.

Ein Teil der Wärme wird benötigt, um die zu beschichtenden Teile und Gehänge in den verschiedenen Prozessschritten zu erwärmen. Nach jedem Schritt kühlen diese in der Halle aus, die anfallende Abwärme wird in den Auskühlzonen gefasst und über Abluftanlagen weggeführt.

Ganz unten im Diagramm ist der Abbrennofen dargestellt. Dieser erzeugt eine beträchtliche Abgasmenge auf einem hohen Temperaturniveau, die für eine Abwärmenutzung sehr gut geeignet wäre.

Der Ofen wurde aber in der Zwischenzeit eliminiert und durch eine chemische Entlackung der Gehänge ersetzt. Zudem hatte der Abbrennofen andere Betriebszeiten, als die Beschichtungsanlage. Aus diesen Gründen wurde der Abbrennofen in der Pinch-Analyse nicht berücksichtigt.

Für die Pinch-Analyse relevant sind die Prozessschritte „Vorbehandlung“, „Haftwassertrockner“ und „Einbrennofen“ mit einem totalen Heizwärmebedarf von 3'879 MWh. Bei einer Anlagenlaufzeit von 4'000 Stunden entspricht das einer mittleren Leistungsaufnahme von 970 kW.

5 Full-Pinch Analyse

Da sich die Erarbeitung der Software Module für eine vereinfachte Pinch-Analyse im Rahmen dieses Projekts stark verzögerte, führte die Firma Helbling Beratung + Bauplanung AG im Dezember 2009 ein volle Pinch-Analyse der Beschichtungsanlage durch.

Zwischenzeitlich wurden auch die Software-Module fertiggestellt. Bei der Diskussion dieser Module ergaben sich noch geringfügige Anpassungen bei der Abschätzung einzelner Energieströme. Vor allem der Wasserverlust in der Vorbehandlung und der Wärmeverlust durch die offenen Türen wurden seither neu berechnet (vgl. Abschnitte 4.1.1 und 4.1.2). Anschliessend wurde die Full Pinch Analyse durch die DM Energieberatung mit den angepassten Energieströmen noch einmal nachvollzogen. Im Folgenden sind die Resultate dieser zweiten Full Pinch-Analyse dokumentiert.

5.1 Energie- und Masseströme

Die Helbling Beratung + Bauplanung erstellte als erstes eine Tabelle der Energie- und Masseströme basierend auf den Berechnungen aus Abschnitt 4.

Anschliessend wurden alle Ströme mit einer Leistung von weniger als 10 kW als nicht relevant für die Analyse eliminiert. Die resultierende Tabelle enthält noch zwölf relevante Masseströme.

Schon die Berechnungen in Abschnitt 4 haben gezeigt, dass ein grosser Teil der Wärmeverluste durch offene Türen entsteht. Diese Wärme ist aber nicht in Form von klar definierten und technisch nutzbaren Masseströmen verfügbar. Die warme Luft tritt bei geöffneten Türen unkontrolliert in die Halle aus. Trotzdem liegt hier ein grosses Potenzial für die Verbesserung der Anlage versteckt. Die Helbling AG wollte diese Ströme daher in die Pinch-Analyse aufnehmen. Da es unrealistisch ist, die enthaltene Wärme zu 100% wieder in den Prozess zurückzuführen, wurden die entsprechenden Masseströme gegenüber den Berechnungen in Abschnitt 4 um 50% reduziert.

Für jeden Prozessschritt wurde ein zusätzlicher Energiestrom eingefügt, der diejenigen Wärmeverluste abbildet, die nicht eindeutig einem Massestrom zugeordnet werden können. Das umfasst z.B. den Wärmeverlust der Öfen infolge der Transmission durch die Wände und durch Abstrahlung. Diese Ströme enthalten implizit auch alle vorher als nicht relevant vernachlässigten Masseströme und ermöglichen so eine ausgeglichene Energiebilanz. Mit diesen zusätzlichen Energieströmen wird erreicht, dass die in der Pinch-Analyse ausgewiesene Heizleistung der tatsächlichen mittleren Leistungsaufnahme entspricht, die sich aus dem Brennstoffverbrauch der Firma und der Anlagenlaufzeit ergibt. In der Pinch-Analyse werden diese Energieströme dem jeweiligen Heizmedium oder englisch der *utility* zugeordnet (Heizwasser bei der Vorbehandlung, Thermoöl bei Haftwasser- und Einbrennofen und Propan beim Angelierofen). Auch die oben erwähnten Wärmeverluste durch offene Türen, von denen ein Anteil von 50% nicht in einem gesonderten Massestrom abgebildet wurden, sind in diesem *Utility*-Strom enthalten.

Die Tabelle mit den für die Pinch-Analyse relevanten Energie- und Masseströme ist im Anhang 5 enthalten.

Schliesslich ergibt sich aus dieser Tabelle direkt die Input-Tabelle für das sogenannte Pinch-Leni-Tool, mit dem die Temperatur-/Leistungskurve (Verbundkurve, *Composite Curve*) und die Pinch-Temperatur bestimmt werden (vgl. Anhang 6).

5.2 Composite Curve

Die untenstehende Abbildung zeigt die sogenannte Composite Curve des Prozesses (vgl. auch Anhang 7).

In blauer Farbe sind Prozesse dargestellt, bei denen ein Massestrom aufgeheizt werden muss. Deutlich zu erkennen sind die Temperaturniveaus von 60°C, 150°C, 170°C und 240°C bei denen jeweils Energie aus den *utilities* (Heizwasser, Thermoöl und Propan) zugeführt werden muss.

In rot sind die abzukühlenden Ströme dargestellt. Dabei handelt es sich in erster Linie um die heiße Luft, die über geöffnete Türen in die Halle austritt.

Das sogenannte delta T_{min} definiert die minimale Temperaturdifferenz zwischen zwei Strömen, damit sie für eine Abwärmenutzung in Frage kommen. Für die vorliegende Kurve wurde eine minimale Differenz von 25°C gewählt. Damit ergibt sich eine Pinch-Temperatur von 47,5°C.

Die grün markierte Fläche definiert den Bereich, in dem Abwärmenutzung möglich ist. In diesem Bereich können die aufzuheizenden Ströme vollständig mit der Wärme der abzukühlenden abgedeckt werden um umgekehrt. Auf der x-Achse entspricht dieser Bereich einer Leistung von 275 kW. Diese Leistung kann also im optimalen Fall durch Wärmetauscher innerhalb des Prozesses wieder zurückgeführt werden.

Oberhalb der grünen Fläche liegt der Bereich, wo keine Abwärme von abzukühlenden Prozessen vorliegt. Die entsprechende Leistung von 688kW muss zwingend von aussen zugeführt werden.

Unterhalb der grünen Fläche liegt der Bereich, der zwingend abgekühlt werden muss. Dieser Anteil beträgt hier 147 kW.

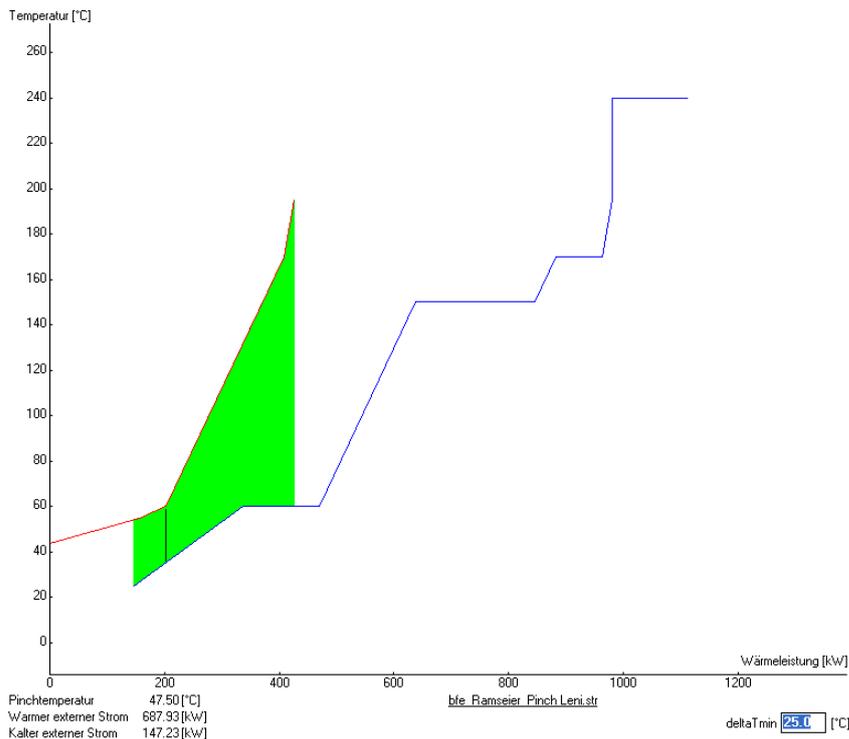


Abbildung 5-1 Composite Curve

5.3 Kostenkurve

Das Pinch-Leni-Tool generiert ebenfalls eine Kurve, die es erlaubt, die minimale Temperaturdifferenz für die Wärmetauscher zu bestimmen (

Abbildung 5-2 und Anhang 8). Die Kurve stellt die Abhängigkeit der jährlichen Energiekosten von der Wahl des delta T_{min} dar. Eine kleine Temperaturdifferenz erhöht das Potenzial für die Abwärmenut-

zung und vermindert so die jährlichen Brennstoffkosten. Andererseits erhöht ein kleines delta T_{min} die Grösse der benötigten Wärmetauscher und erhöht so die Kapitalkosten für die zu tätigen Investitionen. Das Optimum liegt beim tiefsten Punkt der Kurve mit den minimalen Jahreskosten.

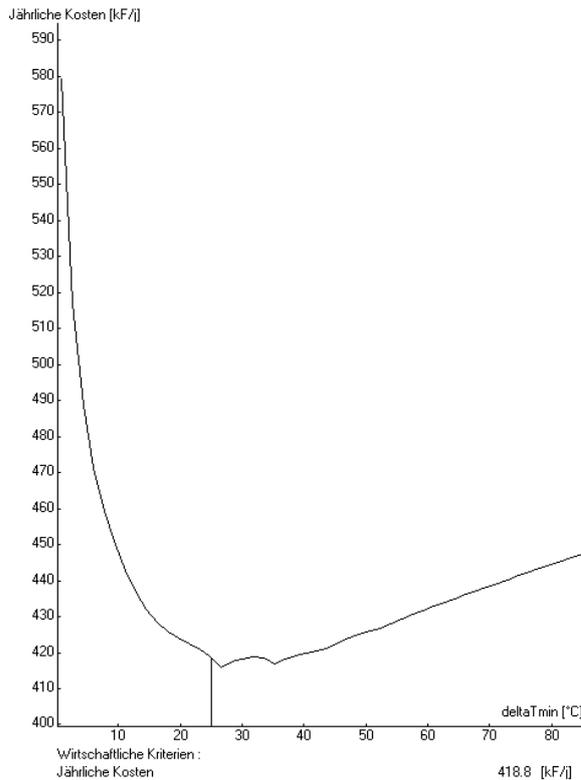


Abbildung 5-2 Kostenkurve

Es fällt auf, dass im vorliegenden Fall die Kurve in der Sohle sehr flach verläuft. Bei den zugrunde gelegten ökonomischen Daten gibt es einen grossen Bereich für delta T_{min}, bei dem sich die Jahreskosten kaum verändern. Anstelle des gewählten delta T_{min} von 25°C könnte auch ein Wert von 35°C gewählt werden. Die Jahreskosten wären unverändert, das Potenzial für Abwärmenutzung würde sich aber von 275 kW auf 220 kW verringern. Mit der Wahl von delta T_{min} = 25°C entscheidet man sich für eine hohe Energieeinsparung bei hohen Investitionskosten, was sich bei tendenziell steigenden Energiekosten sicher auszahlt.

Die ökonomischen Daten wurden wie folgt gewählt:

- Grundkosten für das Wärmetauscher-Netzwerk A = CHF 10'000.-
- Leistungsabhängige Kostenkomponente Cr = CHF 120'000.-
- Rückzahldauer der Investitionen 5 Jahre
- Kapitalzins 5%
- Resultierende Annuität 23%

Das Pinch-Leni-Tool liefert auch Angaben zu den geschätzten Kosten für die Wärmeerzeugung:

- Kosten der Wärmetauscher für die Wärmerückgewinnung CHF 346'000.-
- Kosten eines hypothetischen Wärmetauschers für den warmen externen Strom CHF 403'000.-
- Kosten eines hypothetischen Wärmetauschers für den kalten externen Strom CHF 100'000.-

Somit ergibt sich eine totale geschätzte Investition von CHF 848'000.- und jährliche Kapitalkosten von CHF 195'000.-.

Die Energiekosten werden mit CHF 80.- pro MWh für Wärme (*hot utilities*) und CHF 5.- pro MWh für die Kühlung (*cold utilities*) angesetzt. Bei optimaler Wärmerückgewinnung ergeben sich Energiekosten von CHF 224'000.-.

Die obige Aufstellung zeigt, dass das Pinch-Leni Tool bei der Berechnung des optimalen delta Tmin auch hypothetische Kosten für die Bereitstellung der externen Ströme berücksichtigt. Bei der Optimierung einer bestehenden Anlage kann aber davon ausgegangen werden, dass die Infrastruktur für die Wärme- und Kälteerzeugung vorhanden und weitgehend abgeschrieben ist. Es mag berechtigt sein, für die Erneuerung dieser Anlagen einen gewissen Kostenanteil anzusetzen, die Rückzahldauer des eingesetzten Kapitals wird aber normalerweise viel länger sein, als das für das neu zu bauende Wärmetauscher-Netzwerk angesetzt wird.

Eliminiert man im vorliegenden Fall die Kosten für die hypothetischen externen Wärmetauscher, so ergibt sich das folgende Bild:

- Energiekosten heute:
 - 963 kW x 4'000 h x CHF 80.-/MWh CHF 308'200.-
 - 422 kW x 4'000 h x CHF 5.-/MWh CHF 8'500.-
 - total CHF 316'700.-
- Energiekosten mit optimalem Wärmetauscher-Netzwerk:
 - 688 kW x 4'000 h x CHF 80.-/MWh CHF 220'200.-
 - 147 kW x 4'000 h x CHF 5.-/MWh CHF 2'900.-
 - total CHF 223'100.-
- Einsparung Energiekosten durch optimales Wärmetauschernetzwerk CHF 93'600.-
- Kapitalkosten für Wärmetauschernetzwerk
 - CHF 346'00.- x 23% CHF 79'600.-
- Nettoeinsparung: Einsparung Energiekosten abz. Kapitalkosten CHF 14'000.-

Über die Amortisationszeit von 5 Jahren ist der Ertrag des Wärmetauschernetzwerkes mit CHF 14'000.- recht gering. Erst nach Ablauf dieser Zeit erbringt die Prozessoptimierung einen wesentlichen Ertrag. Würde die Produktionsanlage nach fünf Jahren ausser Betriebe genommen, so hätte die Massnahmen bei Investitionen von rund CHF 350'000.- lediglich einen Nettoertrag von CHF 70'000.- erbracht.

5.4 Wärmetauscher-Netzwerk

Nachdem die minimale Temperaturdifferenz für die Wärmetauscher, das sogenannte delta Tmin, festgelegt ist, kann ein konkretes Wärmetauscher-Netzwerk entworfen werden. Das Pinch-Leni-Tool erstellt dazu eine grafische Darstellung, in der jeder Prozessstrom mit seiner Leistung und den Anfangs- und Endtemperaturen aufgezeichnet ist. Aufzuheizende Ströme sind wiederum blau gezeichnet, abzukühlende rot (vgl. Abbildung 5-3 und Anhang 9).

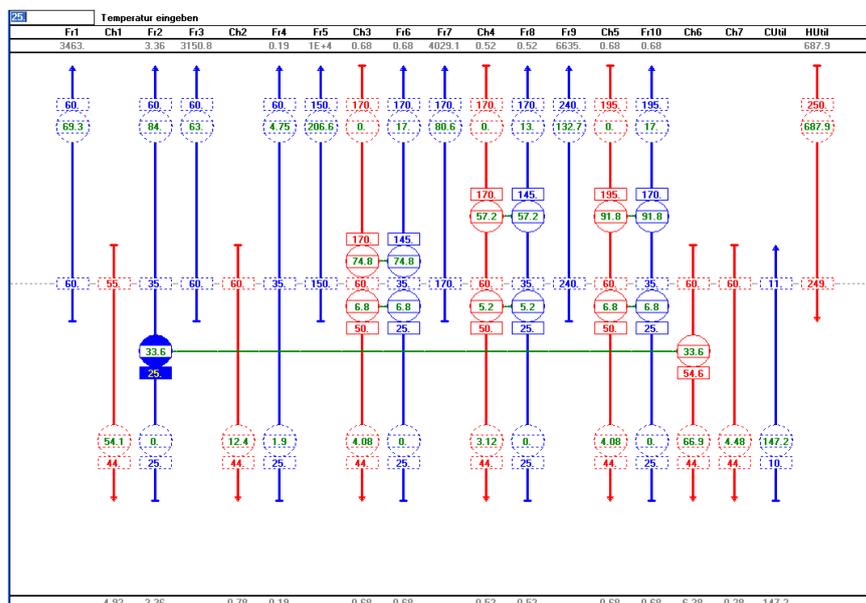


Abbildung 5-3 Wärmetauscher-Netzwerk

Durch Verbindung von zwei Strömen wird ein Wärmetauscher generiert. Dabei werden zuerst die grossen Energieströme berücksichtigt und in einem zweiten Schritt die verbleibenden kleineren Ströme. Im vorliegenden Fall können grosse Leistungen zwischen den folgenden Strömen ausgetauscht werden: Ch3 und Fr6, Ch4 und Fr8, Ch5 und Fr10. Ein weiterer Austausch ist zwischen Ch6 und Fr2 möglich.

Die drei Ströme Ch3, Ch4 und Ch5 stellen die Wärme dar, die bei den drei Öfen (Haftwassertrockner, Angelierung und Einbrennofen) durch die offenen Türen entweicht. Fr6, Fr8 und Fr10 repräsentieren die nachströmende Luft. Als Resultat der Pinch-Analyse zeigt sich also, dass das grösste Potenzial für Abwärmenutzung darin liegt, wenn die warme Luft, die bei den Türen austritt, gefasst wird und über einen Wärmetauscher die nachströmende Luft aufwärmt.

Ch6 stellt die heisse Luft dar, die bei der zweiten Auskühlzone mit einer Abluftanlage abgezogen wird. Mit dieser Wärme kann der Strom Fr2, die Zuluft zum Entfettungsbad, vorgewärmt werden.

Mit diesem Netzwerk kann die theoretisch mögliche Abwärmenutzung von 276 kW (grüner Bereich in der *Composite Curve*) vollständig ausgenutzt werden.

6 Pinch-Light Module

Um den Ramseier-Prozess abzubilden entwickelte die EPF Lausanne sechs Software Module:

- Sprühbad für das Entfettungs- und das Chromatierbad
- Produktkühlung (Gleichstrom-Prinzip) für die Spülbäder
- Metalltrockner für den Haftwassertrockner
- Pulvereinbrennofen für Angelier- und Einbrennofen
- Produktkühlung (Gegenstrom-Prinzip) für die Auskühlzonen
- Regenerative Nachverbrennung für den Abbrennofen

Im Verlauf der Analyse zeigte sich, dass die Energieströme in den Spülbädern durchwegs vernachlässigbar klein sind. Das Modul für die Gleichstrom-Produktkühlung wurde daher aus dem Projekt gelöscht.

Auch der Abbrennofen wurde aus dem Projekt eliminiert. Der Ofen ist mittlerweile schon abgebaut und wird durch eine chemische Entlackung ersetzt. Eine Abwärmenutzung in der bestehenden Anlage kommt nicht mehr in Frage und auch für die neue Anlage muss dieser Prozessschritt nicht weiter untersucht werden.

Somit verbleiben vier Module, die für die Analyse verwendet wurden, Sprühbad, Metalltrockner, Einbrennofen und Produktkühlung im Gegenstromprinzip.

Grundsätzlich wurde bei der Entwicklung der Module der gleiche Weg beschritten, wie bei der bisher beschriebenen Full-Pinch-Analyse. In einem ersten Schritt wurden die physikalischen Vorgänge für jeden Prozessschritt analysiert. Diese Analyse stützt sich zum Teil auf die Berechnungen des Kapitels 4 ab, zum Teil werden andere Ansätze verfolgt. Diese Differenzen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Anschliessend wurden die relevanten Ströme mit einem Algorithmus beschrieben und als Software-Modul programmiert. Grundsätzlich werden in den Software-Modulen nur diejenigen Energieströme ausgewiesen, die sich für eine Abwärmenutzung eignen. Alle übrigen Ströme werden zu einem sogenannten *Utility*-Strom zusammengefasst, der à priori von der Heizung resp. der Kühlung des Gebäudes abgedeckt werden muss.

Jedes Modul verfügt über eine Anzahl von Parametern, mit denen die Berechnung an die konkreten Prozessdaten, sprich die Masseflüsse und andere anlagenspezifische Daten, angepasst wird.

Als Resultat der Simulation generieren die Software-Module eine Stromtabelle, die für die Eingabe in das Pinch-Leni-Tool verwendet wird.

6.1 Modul Sprühbad

Das Modul „Sprühbad“ berücksichtigt drei Ströme:

- Aufheizen der Bad-Nachspeisung
- Abkühlen der Verwerfung (Badinhalt, der periodisch abgelassen wird)
- warme, feuchte Abluft

Zusätzlich berücksichtigt der sogenannte *Utility*-Strom die Heizwärme, die dem Prozessschritt zugeführt werden muss. Eine Vorwärmung der nachströmenden Luft ist nicht vorgesehen.

Die Modellierung der Vorgänge, die beim Besprühen auftreten, erwies sich als sehr schwierig. Vereinfachend wurde auch hier angenommen, dass das einfache Luftvolumen des Sprühtunnels nach dem Sprühvorgang mit Feuchtigkeit gesättigt ist, und dass diese Feuchtigkeit nach jedem Batch-Durchgang mit der Abluft abgeführt wird.

Wenn vom Anwender kein kontrollierter Abluftstrom definiert wird, so geht das Modell davon aus, dass das Luftvolumen des Sprühtunnels pro Batch einmal vollständig ausgetauscht wird. Der Luftaustausch durch die offenen Türen wird nicht berechnet. Das ergibt speziell beim Entfettungsbad deutlich geringere Luftmengen, als die eigenen Berechnungen im Kapitel 4 vermuten lassen. Auf die totale Wärmeleistung des (feuchten) Abluftstroms hat diese Differenz aber nur einen geringfügigen Einfluss, denn der Wärmeinhalt des in der Abluft enthaltenen Wasserdampfes ist weit grösser als derjenige der nachströmenden trockenen Luft.

Weitere Energieströme, wie z.B. die Erwärmung der Metallteile und die über die Wände abgestrahlte Wärme werden berechnet und im *Utility*-Strom berücksichtigt.

6.2 Metalltrockner

Das Modul für den Haftwassertrockner berücksichtigt nur zwei Energie- resp. Masseströme, nämlich einen Anteil Zuluft zum Ofen, der vorgewärmt werden kann und einen Anteil Ofenabluft, der für Wärmerückgewinnung zur Verfügung steht. Alle anderen Energieflüsse werden im *Utility*-Strom zusammengefasst. Dieser berücksichtigt also die benötigte Energie zum Aufheizen der Teile, zum Verdampfen des Haftwassers und die Abstrahl- und Konvektionsverluste des Trockners. Auch die Energie, die zum Aufheizen der nicht gefassten Zuluft benötigt wird, ist im *Utility*-Strom enthalten.

Bei der Modellierung ging man davon aus, dass der totale Strom an Zu- und Abluft nicht bekannt ist. Anstelle der Berechnung eines Luftwechsels durch die offenen Türen, wie sie in Kapitel 4.1.2 beschrieben ist, wurde eine Abschätzung über die Leistungsbilanz des Trockners vorgenommen. Dazu muss die totale Heizleistung des Trockners bekannt sein. Von dieser Heizleistung werden alle übrigen aufzuwärmenden Ströme abgezogen, der Rest wird für die Erwärmung der Zuluft angesetzt. Bei bekannter Ofentemperatur ergibt sich daraus eine Abschätzung der totalen aufzuwärmenden Zuluftmenge.

Mit je einem Parameter wird der Anteil der für die Wärmerückgewinnung gefassten Menge an Zu- und Abluft definiert. Bei der Full-Pinch-Analyse wurde dieser Anteil mit 50% angesetzt. Dieser Wert wurde auch für die Analyse mit den Software-Modulen verwendet.

Sicherheitshalber wurde bei der Abluft die latente Wärme des verdunsteten Wassers weggelassen, damit nicht mit zu optimistische Werte für die nutzbare Abwärme entstehen.

6.3 Einbrennofen

Beim Einbrennofen wurde ein ähnlicher Ansatz verfolgt, wie beim Haftwassertrockner. Auch hier wird der totale Zuluftstrom aus der Leistungsbilanz des Ofens berechnet. Das setzt voraus, dass die Heizleistungen sowohl für den ersten Teil des Ofens, den Angelierofen, wie auch für den zweiten Teil, den eigentlichen Einbrennofen, mit genügender Genauigkeit bekannt sind.

Auch hier wird vorausgesetzt, dass ein zu definierender Anteil des Zuluftstromes vorgeheizt und ein Anteil des Abluftstromes über einen Wärmetauscher abgekühlt werden kann.

Zusätzlich wird ein Luftstrom modelliert, der bei der Türöffnung vom ersten Ofenteil zum zweiten übertritt. Dieser Anteil wird aber nicht innerhalb des Modules berechnet sondern muss als Eingabeparameter vorgegeben werden. Für die Anlage Ramseier wird dieser Anteil mit 25% der Zuluft zum Angelierofen angesetzt.

6.4 Produktkühlung im Gegenstromprinzip

Dieses Modul ist sehr allgemein gehalten und beschreibt im Wesentlichen einen Gegenstromwärmetauscher. Im Ramseier-Prozess wird es dazu verwendet, die Auskühlzonen zu modellieren, wo die heissen Teile und Gehänge auf Hallentemperatur abkühlen.

Das Gegenstrom-Prinzip bedeutet, dass der Fluss des Kühlmediums entgegengesetzt zum Produktfluss verläuft. Das Kühlmedium trifft beim Eintritt auf die bereits abgekühlten Teile, wärmt sich im weiteren Verlauf sukzessive auf und tritt am heissen Ende beim Produkteintritt aus. Somit kann das Kühlmedium theoretisch bis knapp unter die Eintrittstemperatur des Produktes erhitzt werden.

Im Fall der Auskühlzonen würde das bedeuten, dass die Teile und Gehänge in einer geschlossenen Kammer auskühlen, bei der am kalten Ende Hallenluft eintritt und am heissen Ende eine Abluft auf hohem Temperaturniveau vorliegt. Dieser Ansatz birgt ein grosses Verbesserungspotenzial in sich und wurde für die Projektierung der neuen Anlage als Vorschlag eingebracht.

6.5 Resultate der Modellierung

Mit den oben beschriebenen Modulen kann der Beschichtungsprozess der Firma Ramseier vollständig modelliert werden. Als Resultat generieren die Module eine Strom-Tabelle, die wiederum als Input für das Pinch-Leni Tool dient. Mit dem Pinch-Leni Tool wird das delta T_{min} bestimmt und anschliessend ein theoretisches Wärmetauschernetzwerk für einen minimalen Energieaufwand festgelegt.

Die Stromtabelle ist im Anhang 10 enthalten, die Composite- und Kostenkurven in den Anhängen 11 und 12 und das Wärmetauscher-Netzwerk im Anhang 13. Die Composite- und Kostenkurven sind zusätzlich im Text als Abbildungen 6-1 und 6-2 enthalten.

6.5.1 Composite Curve

Qualitativ sieht die Composite Curve sehr ähnlich aus, wie diejenige aus der Full-Pinch Analyse. Die markantesten Unterschiede sind:

- Pinch-Temperatur von 51.5°C, d.h. 4°C höher als bei der Full-Pinch Analyse.
- Unterhalb des Pinch-Punktes werden Luftströme bis 20°C abgekühlt. Bei der Full-Pinch Analyse wurde nur eine Abkühlung bis 45°C modelliert.
- Oberhalb des Pinch-Punktes wird Wärme bei 60°C, 150°C und 195°C zugeführt. Bei der Full-Pinch-Analyse ist noch die Temperatur des Angelier-Ofens von 170° sichtbar und für den Einbrennofen wurde eine Heiztemperatur von 240°C anstatt 195°C vorgegeben.
- Der kalte externe Strom ist mit 258 kW deutlich grösser, als bei der Full-Pinch Analyse. Der Grund liegt bei der tieferen Endtemperatur von 20°C bei den abzukühlenden Strömen.
- Der warme externe Strom ist mit 630 kW etwas geringer. Das hängt mit der Wahl des delta T_{min} zusammen, das bei der Pinch-Light Methode mit 17°C deutlich tiefer liegt, als bei der Full-Pinch Analyse. Dieser Unterschied wird weiter unten kommentiert.
- Die totale Leistung der aufzuheizenden Ströme ist mit 860 kW rund 10% tiefer wie bei der Full-Pinch Analyse. Diese Differenz könnte mit einer Feinabstimmung der Eingabe-Parameter der Module korrigiert werden. Mit einer Korrektur der *Utility*-Leistungen von Haftwassertrockner und Einbrennofen kann die Differenz einfach ausgeglichen werden. In Anbetracht der Tatsache, dass die Weiterentwicklung der Software-Module gestoppt wurde, verzichten wir auf diesen Abgleich. Auf das Wärmetauschernetzwerk hätte dieser Abgleich keine Auswirkung.

- Der grün markierte Bereich, in dem eine Abwärmenutzung grundsätzlich möglich ist, ist mit 220 kW geringer, als bei der Full-Pinch Analyse. Der Grund dafür liegt in der unterschiedlichen Modellierung der Vorbehandlung. Dieser Aspekt wird ebenfalls weiter unten kommentiert.

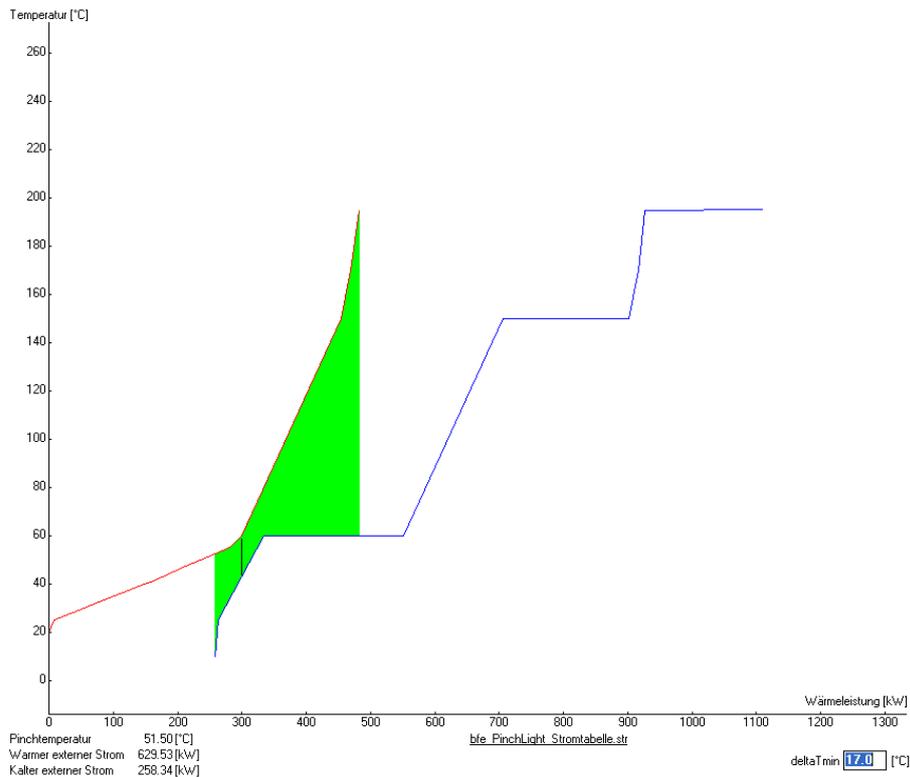


Abbildung 6-1 Composite Curve der Pinch-Light Analyse

6.5.2 Kostenkurve

Bei der Kostenkurve fällt auf, dass die Jahreskosten deutlich tiefer ausfallen. Das Optimum liegt bei einem delta T_{min} von 17°C und beträgt CHF 377'600.- im Vergleich zu CHF 418'800.- bei der Full-Pinch Methode. Dafür gibt es zwei Gründe:

- Die Software-Module verwenden andere Vorgaben für die Wärmeübergangswerte (alpha-Werte), die den Masseströmen zugeordnet werden. So verwendet der Helbling-Ingenieur bei der Full-Pinch Analyse einen Wert von 50 W/(m².K) bei den Zu- und Abluftströmen, während die Software-Module einen Wert von rund 10'000 W/(m².K) ansetzen. Dadurch werden die abgeschätzten Investitionskosten für das Wärmetauschernetzwerk und damit auch die Kapitalkosten viel geringer. Um gleiche Werte zu erhalten, müssten die Default-Werte bei den Software-Modulen überschrieben werden.
- Das Total der aufzuheizenden Ströme ist kleiner, als bei der Full-Pinch Analyse. Dadurch ergeben sich tiefere Energiekosten. Durch den oben erwähnten Abgleich der Utility-Ströme könnte diese Differenz eliminiert werden.

Setzt man für den Wärmeübergang der Luftströme die korrekten Werte von 50 W/(m².K) ein so verändert sich die Kostenkurve ganz markant (vgl. Abbildung 6.3). Das optimale delta T_{min} wird viel grösser und beträgt 35°C, die Jahreskosten steigen auf CHF 431'000.-.

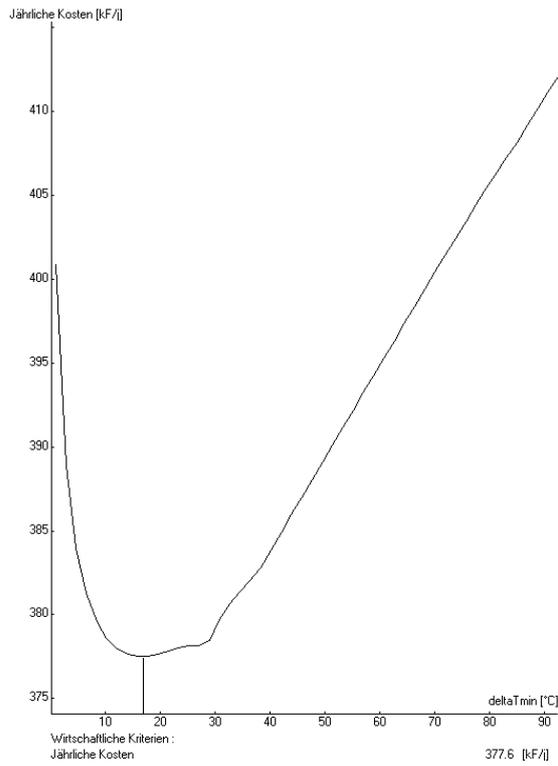


Abbildung 6-2 Kostenkurve der Pinch-Light Analyse

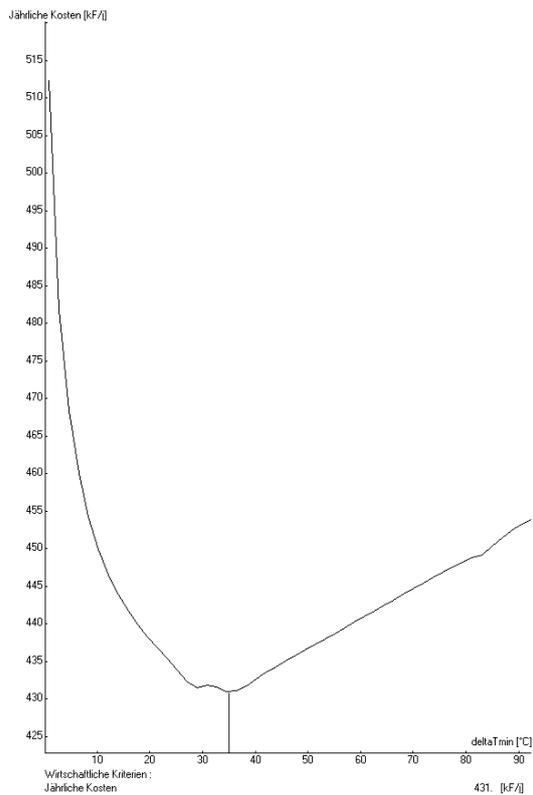


Abbildung 6-3 Kostenkurve mit realistischen alpha-Werten

6.5.3 Wärmetauscher-Netzwerk

Erst beim Vergleich der Netzwerk-Darstellung (ohne Wärmetauscher-Netzwerk) der beiden Analysen fällt der wesentliche Unterschied bei der Modellierung auf. Der Strom Fr2, der bei der Full-Pinch Analyse die Vorwärmung der Zuluft für das Entfettungsbad modelliert, fehlt bei der Pinch-Light Analyse völlig. Unter der Annahme, dass dieser Luftstrom in Realität nicht gefasst ist und auch nicht vorgewärmt werden kann, wurde beim entsprechenden Software-Modul dieser Energiestrom zum *Utility*-Strom addiert. Damit erklärt sich auch die höhere Pinch-Temperatur bei der zweiten Modellierung, denn dieser Strom bestimmt bei der Full-Pinch Analyse den Pinch-Punkt. Auch die geringere Überdeckung der beiden Kurvenzüge in der *Composite Curve* (grüne Fläche) ist damit erklärt, da dieser Strom im unteren Teil der blauen (aufzuheizenden Kurve) zu einem viel flacheren Verlauf führt.

Beim Entwurf des Wärmetauscher-Netzwerks wurde die gleiche Strategie verfolgt, wie bei der Full-Pinch Analyse. Grundsätzlich soll bei jedem Prozessschritt die kalte Zuluft mit der heissen Abluft vorgewärmt werden. Beim Haftwasser-Trockner gelingt dieser Ansatz, beim Einbrennofen ist das nicht ohne weiteres möglich.

Eine Grundregel des Pinch-Verfahrens liegt darin, dass zwischen den beiden Teilsystemen ober- und unterhalb des Pinch-Punktes keine Wärme übertragen wird. Grundsätzlich hat das obere Teilsystem ein Wärmedefizit und muss aufgeheizt werden und das untere Teilsystem hat einen Wärmeüberschuss und muss gekühlt werden. Jeder Wärmestrom von oberhalb des Pinch-Punktes in das Teilsystem darunter muss dort zwingend wieder weggekühlt werden. Das Pinch-Leni-Tool lässt daher keine Wärmetauscher zu, die über den Pinch-Punkt gehen.

Die zweite Regel betrifft die Leistung der Ströme. Ein Wärmetauscher kann nur funktionieren, wenn die Leistung des ausgehenden Stromes grösser ist als diejenige des eintretenden Stroms. Oberhalb des Pinch-Punktes heisst das, dass die Leistung des aufzuwärmenden Stroms grösser sein muss als die Leistung des abzukühlenden. Ist diese Regel nicht erfüllt, so verringert sich im Wärmetauscher die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Strömen über die Länge des Wärmetauschers stetig, die Wärme kann nicht übertragen werden. Ist diese Regel nicht erfüllt, so muss der abzukühlende Strom aufgeteilt werden und es wird nur ein Teil der Heizleistung an den aufzuwärmenden abgegeben.

Im vorliegenden Fall tritt dieser Effekt beim Einbrennofen auf. Das entsprechende Software-Modul modelliert einen internen Luftstrom vom ersten Ofenteil in den zweiten. Dadurch wird die Leistung des Abluftstroms im zweiten Ofenteil grösser als die Leistung des Zuluftstroms. Bei der Full-Pinch Analyse hatten beide Ströme die gleiche Leistung und es konnte je ein Wärmetauscher über und unter dem Pinch-Punkt platziert werden. Die heisse Abluft würde also die kalte Zuluft optimal vorwärmen. Mit den Daten der Pinch-Light Analyse ist das nicht möglich. Der heisse Abluftstrom (Ch11) muss aufgespalten werden und es entsteht ein komplexes Wärmetauscher-Gebilde, bei dem die heisse Abluft zuerst aufgeteilt, ein Teil davon extern abgekühlt und anschliessend wieder zusammengefasst werden muss.

In der Theorie ist dieses Netzwerk sicher optimal. Es verbleibt eine Leistung von 14,7 kW aus dem abzukühlenden Strom auf hohem Temperaturniveau und unterhalb des Pinch-Punktes muss dieser Strom nur noch mit 10,2 kW abgekühlt werden. Die verbleibende Leistung von 14,7 kW kann aber nicht genutzt werden. In der Praxis würde wohl eher ein einfacher Wärmetauscher mit den folgenden Daten realisiert:

- Abluftstrom von 195°C auf 77°C abkühlen, ergibt eine Leistung von 58 kW
- Zuluftstrom von 25°C auf 178°C aufwärmen, ergibt die gleiche Leistung

Die Wärmetauscher-Leistung ist die gleiche, wie beim theoretischen Ansatz, der Nachteil liegt einzig darin, dass die Abluft mit 77°C über Dach abgeführt werden muss.

Mit dem vorgeschlagenen Wärmetauscher-Netzwerk kann eine Leistung von 196 kW in den Prozess zurückgeführt werden. Das Ideal von 220 kW (grüner Bereich in der *Composite Curve*) kann nicht vollständig ausgenutzt werden.

7 Vergleich der Analysen

Grundsätzlich stimmen die beiden Analysen gut überein. Bei beiden Analysen ergibt sich als Fazit eine Einsparung von rund 25% indem die heisse Abluft von Ofen und Trockner verwendet wird, um die Zuluft vorzuwärmen. Bei der Full-Pinch Analyse wird zudem die Zuluft zur Vorbehandlung mit der Abluft aus der Auskühlzone vorgewärmt, was eine weitere Einsparung um 3% ergibt.

Einige Unterschiede sind im vorhergehenden Kapitel beschrieben. In der folgenden Aufzählung sind die wesentlichen Abweichungen noch einmal zusammengestellt:

- Vorbehandlung: Pinch Light modelliert keinen aufzuwärmenden Zuluftstrom. Dadurch erhöht sich die Pinch Temperatur und das Potenzial für Abwärmenutzung wird geringer.
- Benötigte Heizleistung (*Utility*): Bei den Pinch-Light Modulen für den Haftwassertrockner und den Einbrennofen wird die benötigte Heizleistung über einen Parameter vorgegeben. Über die Energiebilanz wird der Aussenluftstrom berechnet. Bei der Vorbehandlung wird der umgekehrte Weg gewählt, der Luftwechsel muss vorgegeben werden und daraus wird die benötigte Heizleistung berechnet. Dieser Ansatz macht es etwas schwieriger, die Heizleistung des Systems und damit den Energiebedarf mit dem tatsächlichen Brennstoffverbrauch in Übereinstimmung zu bringen. Die Pinch-Light Analyse zeigt daher einen um 110 kW tieferen Heizleistungsbedarf, als die Full-Pinch Analyse.
- Bei der Pinch-Light Analyse werden die Abluftströme auf eine Temperatur von 25°C abgekühlt, die Abluft der Auskühlzone auf 20°C. Bei der Full-Pinch Analyse wurde nur auf 44°C abgekühlt. Diese unterschiedlichen Anforderungen führen zu einer abweichenden Kostenkurve und letztlich zu einer anderen Wahl des delta T_{min}. In Realität sind die 25°C resp. 20°C keine zwingenden Prozessanforderungen. Der Einfluss der entsprechenden Eingabeparameter bei den Pinch-Light Modulen auf die Resultate der Analyse ist nicht einfach nachzuvollziehen.
- Wärmeübertragungswerte: Pinch-Light verwendet zum Teil völlig andere alpha-Werte als Helbling für die Full-Pinch Analyse. Dadurch fallen die Jahreskosten deutlich tiefer aus.
- Angelier- und Einbrennofen: Pinch-Light modelliert einen Luftstrom vom ersten Teil des Ofens zum zweiten. Dadurch hat beim Einbrennofen die austretende Abluft eine höhere Leistung als die Zuluft. Das Wärmetauscher-Netzwerk wird viel komplizierter und würde in der Praxis kaum so ausgeführt.
- Auskühlzone 2: Das Pinch-Light Modul für Produktkühlung berechnet die Luftmenge anhand der Wärmelast der abzukühlenden Teile und Träger. Die so berechnete Luftmenge ist viel kleiner, als diejenige der in Realität vorhandenen Abluftanlage. Die physikalische Berechnung im Pinch-Light Modul ist korrekt, die Abluftanlage führt also viel mehr Wärme ab, als die Teile und Gehänge nach dem Ofen abstrahlen. Dieser Wärmestrom (Konvektion und Abstrahlung der verschiedenen Anlagenteile etc.) müsste mit einem zusätzlichen Modul abgebildet werden. In der Full-Pinch Analyse wurde er verwendet, um die Zuluft der Vorbehandlung aufzuwärmen.

8 Massnahmen neue Anlage

Während der Laufzeit dieses Forschungsprojekts hat die Firma Ramseier entschieden, die bestehende Beschichtungsanlage durch einen Neubau zu ersetzen. Die thermische Entlackungsanlage für die Gehänge ist bereits abgebaut und wurde durch eine chemische Entlackung ersetzt.

Mit den Erkenntnissen aus der Full-Pinch Analyse konnte eine Reihe von Empfehlungen abgegeben werden, die zum Teil in die Projektierung der neuen Anlage eingeflossen sind. Auch für die neue Anlage wurden die Energie- und Masseströme aller Teilprozesse berechnet, sodass die Einsparwirkung der vorgeschlagenen Massnahmen quantifiziert werden kann.

Die neue Anlage wird eine wesentlich grössere Kapazität haben und wird mit Erdgas betrieben. Die Berechnungen ergeben einen erwarteten Jahresverbrauch von 6'600 MWh (Endenergie).

Die Analysen haben klar gezeigt, dass die heisse Abluft, die beim Öffnen der Türen entweicht, die grössten Abwärmeströme verursacht. Bei der neuen Anlage kommen weitere relevante Ströme dazu, die bei der alten Anlage nicht vorhanden waren:

- Trockner: direkt mit Erdgas beheizt. Die Rauchgase vermischen sich mit der Kammerluft und werden über eine Abluftanlage mit 3'400 m³/h abgeführt.
- Einbrennofen: ebenfalls mit Erdgas beheizt. Die Rauchgase werden in zwei Rauchrohren gefasst und über Dach abgeführt.
- Einbrennofen: Kammerabluft wird mit 3'400 m³/h abgesaugt und kann in den Haftwassertrockner eingeblasen werden.
- Entlackung: Im Konzept ist eine elektrisch beheizte chemische Entlackung vorgesehen. Der Strombedarf wird mit 165 MWh pro Jahr abgeschätzt.

Eine erste Form der Abwärmenutzung ist also bereits im ursprünglichen Konzept vorhanden. Durch die Einblasung der Kammerluft aus dem Einbrennofen in den Trockner können pro Jahr 200 MWh eingespart werden.

Weitere Einsparmöglichkeiten bestehen direkt bei der Wärmerzeugung und basieren nicht auf einer Prozessanalyse:

- Die Brenner von Ofen und Trockner sind oben auf den Kammern angeordnet und ziehen auf 40°C bis 45°C vorgewärmte Luft an. Die Einsparung beträgt rund 30 MWh pro Jahr.
- Aus der Halle werden rund 35'000 m³/h Luft abgesogen. Im Winter muss die nachströmende Luft aufgeheizt werden. Die Nachströmöffnung wird direkt über dem Ofen angebracht, die Zuluft wärmt sich über die Strahlungs- und Konvektionsverluste des Ofens auf. Die Einsparung beträgt rund 600 MWh pro Jahr.
- Beim Einbrennofen kann ein Rauchgas-Rekuperator eingebaut werden. Die Wärme kann z.B. für die Beheizung des Entlackungsbades verwendet werden. Die erwartete Einsparung beträgt 150 MWh Elektrizität pro Jahr (Entlackung elektrisch beheizt).

Schliesslich wurde der Ramseier AG empfohlen, eine bessere Dämmung des Einbrennofens zu verlangen. Eine Verbesserung des mittleren U-Wertes von 0,5 W/m² auf 0,25 W/m² bringt eine jährliche Einsparung von 200 MWh und ist in 3 Jahren amortisiert.

Die wichtigste Erkenntnis der Pinch-Analyse ist es allerdings, die warme Abluft von Ofen und Trockner zu nutzen. Dazu müsste die Luft, die beim Öffnen der Türen austritt, gefasst werden. Das könnte z.B. mit einer vorgelagerten Auskühlkabine erfolgen, wie sie bereits bei der alten Anlage nach dem Einbrennofen vorhanden war. Anstatt die Luft über Dach abzuführen, müsste sie in eine gleichartige Vorwärmekabine vor dem Ofen geführt werden.

Als Alternative wurde dem Anlagenbauer vorgeschlagen, die Luft der Auskühlkabine über einen Luft-/Wasser-Wärmetauscher abzukühlen. Es sollte möglich sein, eine Wassertemperatur von 80°C zu erreichen, womit die Bäder beheizt werden können. Die Einsparung wurde mit 520 MWh pro Jahr abgeschätzt.

Die technische Umsetzung dieser zwei Alternativen stösst auf Schwierigkeiten. Der Anlagenbauer befürchtet eine Verschmutzung der Luftkanäle und Wärmetauscher durch Lackkomponenten, die in der heissen Abluft des Ofens enthalten sind. Anlagenbauer und Betreiber haben sich daher für eine andere Lösung entschieden. Man verzichtet darauf, die heisse Abluft direkt zu fassen und lässt sie in eine Art Wärmedom unter dem Hallendach aufsteigen. Aus der Praxis kann erwartet werden, dass unter dem Hallendach eine Temperatur von 40°C bis 45°C entstehen wird. Die Wärme wird über eine Wärmepumpe auf 65°C angehoben und in das Heizungsnetz eingespeist.

Vom Heizungsnetz werden auch die Gebäudeheizung und der Nahwärmeverbund versorgt. Man rechnet mit einer Brennstoffeinsparung von 2'500 MWh pro Jahr bei einem Mehraufwand von 430 MWh elektrischer Energie für die Wärmepumpe.

9 Fazit und Empfehlung

Für die Beschichtungsanlage der Firma Ramseier AG ergibt die Pinch-Analyse ein Einsparpotenzial von 25% durch Prozessintegration. In dieses Ergebnis sind Annahmen eingeflossen, die bereits im Voraus die technische Umsetzung des Wärmetauscher-Netzwerkes berücksichtigen. So modelliert Pinch-Light keinen vorzuwärmenden Zuluftstrom in der Vorbehandlung und bei Ofen und Trockner werden nur 50% des tatsächlichen Luftwechsels berücksichtigt. Diese Annahmen ausserhalb der Pinch-Analyse haben einen viel stärkeren Einfluss auf das Resultat, als die genaue Modellierung der einzelnen Ströme.

Eine Prozessanalyse bringt in jedem Fall ein vertieftes Verständnis der Energieflüsse und zeigt, wo Wärme verloren geht. Beim Beispiel Ramseier sind es die Abluftströme, die den grössten Wärmeverlust verursachen. Die Zahl von 25% Einsparpotenzial ist wenig aussagekräftig. Wenn in Realität viel Abluft gefasst werden kann, so ist das Einsparpotenzial hoch, wenn nicht, so ist es gering. Die eigentliche Pinch-Methodik entwickelt ihren Nutzen erst dann, wenn die Prozessdaten und -anforderungen mit guter Genauigkeit bekannt sind.

Als weiteres Fazit aus der Praxis zeigt sich, dass Abwärme oft auch in das Heizungssystem abgegeben wird. Die klassische Pinch-Methode sieht nur Wärmetauscher zwischen Prozessströmen vor. Bei der Entwicklung der Software-Module war vorgesehen, dass zu einem späteren Zeitpunkt auch Wärmetauscher zu sog. *Utility*-Strömen ermöglicht werden. Bei einer Wiederaufnahme der Arbeiten sollte dieser Aspekt weiterverfolgt werden.

Ein Hauptziel des vorliegenden Projekts war es, mit den Software-Modulen ein Expertensystem zu entwickeln, das dem Anwender eine vereinfachte Pinch-Analyse ermöglicht. Dabei sind nun verschiedene Problem aufgetreten:

- Die realisierten Anlagen variieren stark. Einige Module, die für die alte Anlage programmiert wurden, passen für die neue schon nicht mehr (direkte Beheizung mit Erdgas).
- Die Auswirkungen der Parameter auf die Resultate der Analyse sind nicht einfach zu verstehen. So legt z.B. der Parameter „Umgebungstemperatur“ beim Modul Einbrennofen eine Prozessanforderung für die Abkühlung des Abluftstroms fest. In Realität ist hier ein weiterer Bereich zulässig, die Abluft muss nicht aktiv gekühlt werden. Bei einem zukünftigen Expertensystem muss die Auswirkung der Parameter auf die Stromtabelle klar ersichtlich sein. Es ist äusserst umständlich, aus der Stromtabelle oder der Composite Curve wieder auf die Eingabeparameter zurückzuschliessen.
- Fehler im Expertensystem können die Resultate stark verfälschen. So führen im vorliegenden Fall die falschen alpha-Werte zu einem falschen delta T_{min}, was die Wärmetauscher unnötig vergrössert. Bei komplexen Systemen kann der Anwender nicht alle Berechnungen nachkontrollieren. Die Anforderungen an die Qualität des Expertensystems sind daher sehr hoch.

Das Expertensystem beinhaltet Chancen und Gefahren. Einerseits kann es dem Anwender Fehler und Lücken in seinem Prozessverständnis aufzeigen. Neben den für die Analyse benötigten Prozessströmen werden Zwischenresultate berechnet, mit denen Abschätzungen und Annahmen überprüft werden können. Am Beispiel Ramseier zeigte sich z. Bsp. dass bei der Auskühlzone die Luftmenge viel grösser ist, als es für die Abkühlung der Teile notwendig wäre. Bei der Vorbehandlung berechnet das Modul die Wassermenge, die pro Batch verdunstet. Damit kann die Wasserbilanz überprüft werden.

Das Expertensystem kann auch helfen, den Anwender auf die relevanten Ströme zu fokussieren und ihn zwingen, die relevanten Daten zu beschaffen. So genutzt bietet das Expertensystem dem Anwender eine grosse Hilfe bei der Prozessanalyse und wir empfehlen dem Bundesamt für Energie, die Arbeiten an den Software-Modulen unter geeigneten Voraussetzungen wieder aufzunehmen.

Die Gefahr des Expertensystems liegt allerdings darin, dass es dem Anwender ermöglicht, mit relativ wenig Fachwissen eine Pinch-Analyse durchzuführen. Unsorgfältig gewählte Eingabeparameter oder gar Fehler im Expertensystem verfälschen das Resultat stark. Möglicherweise sind die Risiken einer falschen Modellierung sogar grösser als der Nutzen des Expertensystems. Bei der Schulung der Anwender muss auf diese Gefahr hingewiesen werden.

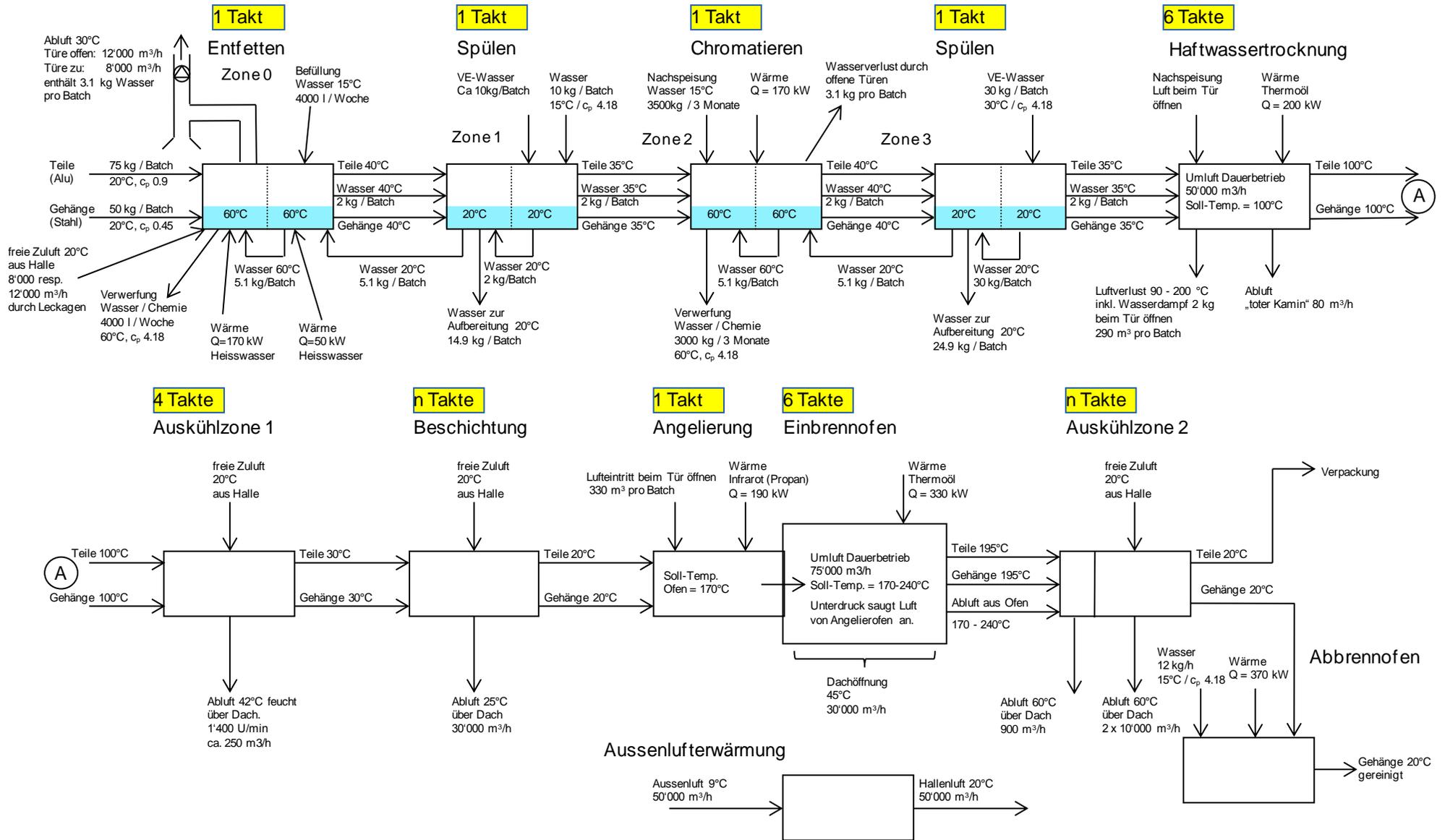
10 Literaturverzeichnis

- Gloor, R. (1996) *Energiesparmöglichkeiten in der Lackiertechnik*, RAVEL-Dokumentation Nr. 724.397.21.07 D, 1996, www.energie.ch
- Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2006) *Energieeinsparung in Lackierbetrieben – Langfassung*, http://www.lfu.bayern.de/luft/fachinformationen/co2_minderung/, Augsburg, 2006

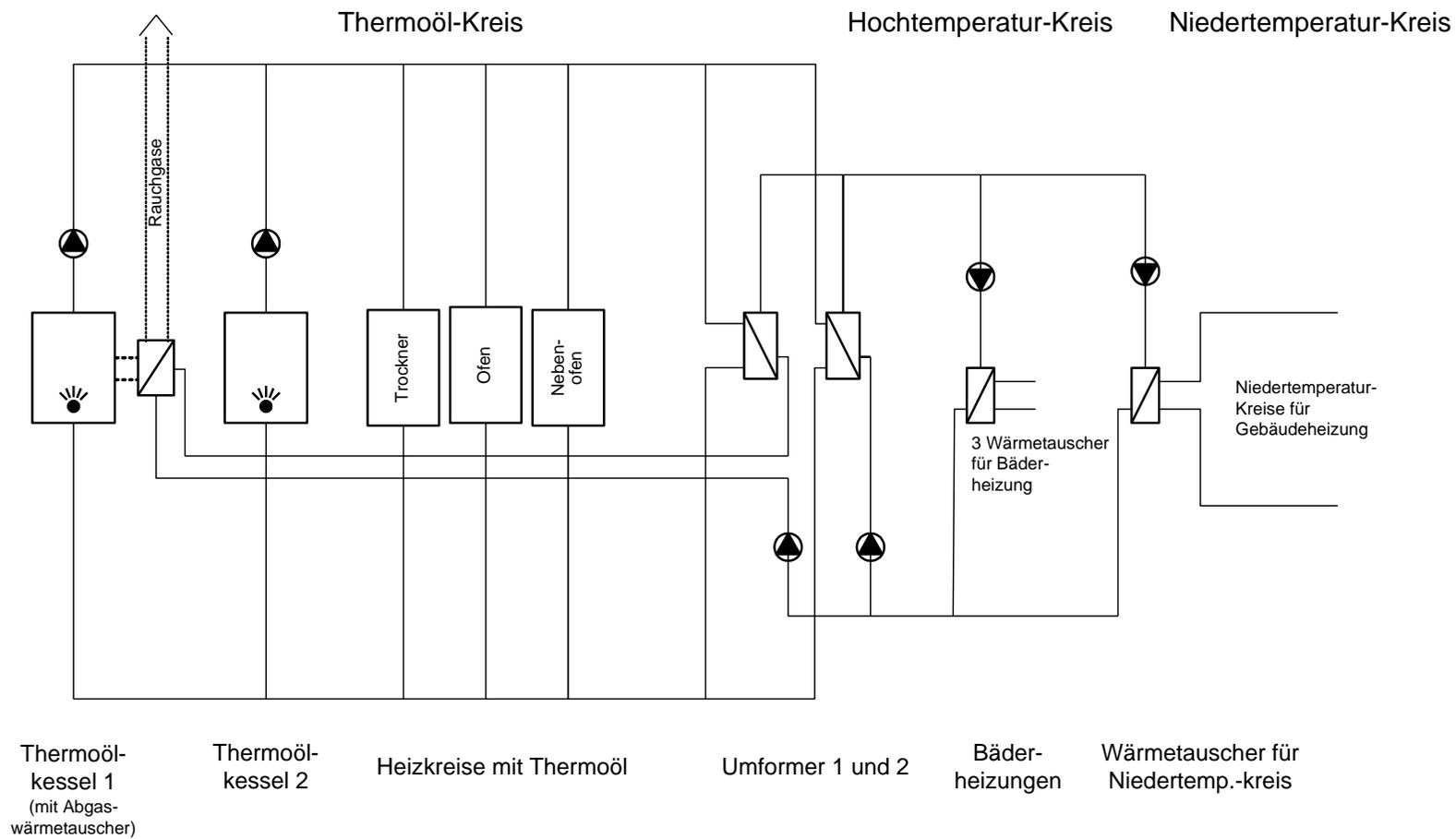
11 Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Prozessschema	31
Anhang 2: Schema der Wärmeerzeugung	32
Anhang 3: Berechnung der Energieflüsse	33
Anhang 4: Energieflussdiagramme	36
Anhang 5: Energie- und Masseströme für die Pinch-Analyse	38
Anhang 6: Stromtabelle des Full Pinch	39
Anhang 7: Composite Curve des Full Pinch	40
Anhang 8: Kostenkurve der Full Pinch Analyse	41
Anhang 9: Wärmetauscher-Netzwerk	42
Anhang 10: Stromtabelle aus den Software Modulen	43
Anhang 11: Composite Curve aus Daten der Software Module	44
Anhang 12: Kostenkurve aus Daten der Software Module	45
Anhang 13: Wärmetauscher-Netzwerk aus Daten der Software Module	46

Anhang 1: Prozessschema



Anhang 2: Schema der Wärmeerzeugung



Anhang 3: Berechnung der Energieflüsse

Pinchlight-Analyse Ramseier Rubigen		Alte Anlage								
Vorbehandlung										
Energieflüsse (Daten pro Linie)	Anfangstemp.	Endtemp.	Differenz	Medium	Menge	spez. Wärme	Energiemenge pro Batch	mittlere Leistung	jährliche Energiemenge	
	[°C]	[°C]	[°C]		[kg]	[kJ/kg.K]	[MJ]	[kWh]	[kW]	[MWh]
Zone 0										
Objekte aufheizen	20	40	20	Alu	75	0.9	1.35	0.38	5.6	23
Traversen aufheizen	20	40	20	Stahl	50	0.46	0.46	0.13	1.9	8
Wasser aufheizen	20	60	40	Wasser	6.0	4.19	1.00	0.28	4.2	17
Abluft Kammer aufheizen	20	55	35	Luft	9'500 m3/h	1.15 kJ/m3.K	25.54	7.09	106.4	426
Wasserdampf Kammer aufheizen	20	55	35	feuchte Luft	54 m3/Batch	182 kJ/m3	9.85	2.74	41.0	164
Wärmeverlust durch offene Türen	55	20	35	Luft	3'650 m3/h	1.15 kJ/m3.K	3.27	0.91	13.6	55
Wärmeverluste durch Transmission	60	20	40	Wärme	101 m2	3.00 W/m2.K	2.92	0.81	12.2	49
Total berechnet									184.9	740
Wärmetauscherleistung									220	704
Zone 2										
Objekte aufheizen	35	40	5	Alu	75	0.9	0.34	0.09	1.4	6
Traversen aufheizen	35	40	5	Stahl	50	0.46	0.12	0.03	0.5	2
Wasser aufheizen	35	60	25	Wasser	2.0	4.19	0.21	0.06	0.9	3
Abluft und Wasserdampf Kammer	35	55	20	feuchte Luft	54 m3/Batch	182 kJ/m3	9.83	2.73	41.0	164
Wärmeverlust durch offene Türen	55	20	35	Luft	3'650 m3/h	1.15 kJ/m3.K	3.27	0.91	13.6	55
Wärmeverluste durch Transmission	60	20	40	Wärme	101 m2	3.00 W/m2.K	2.92	0.81	12.2	49
Total berechnet									69.5	278
Wärmetauscherleistung									170	544



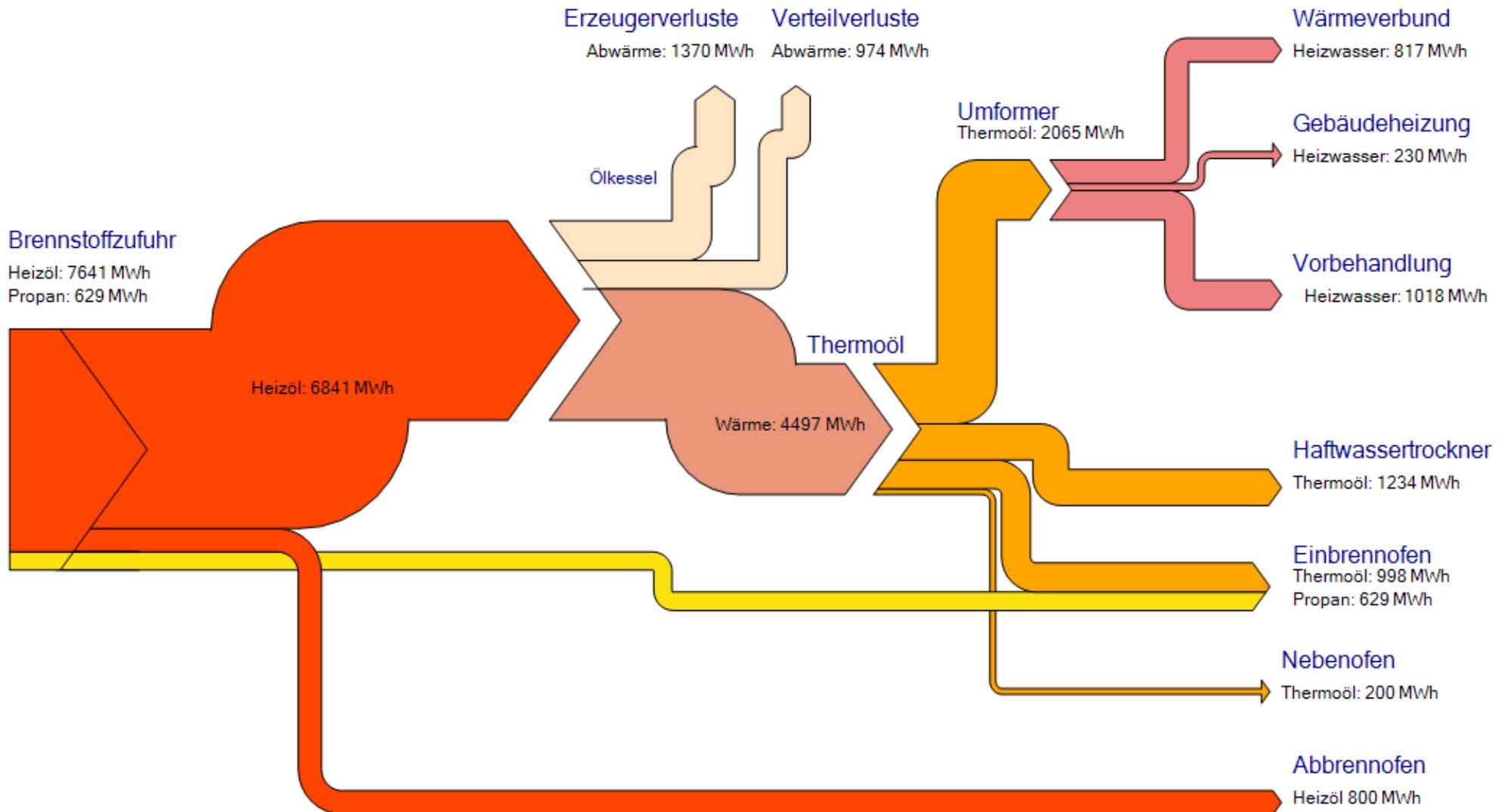
Haftwassertrockner										ENERGIEBERATUNG AG
Energieflüsse	Anfangstemp.	Endtemp.	Differenz	Medium	Menge	spez. Wärme	Energienmenge pro Batch		mittlere Leistung	jährliche Energiemenge
	[°C]	[°C]	[°C]		[kg]	[kJ/kg.K]	[MJ]	[kWh]	[kW]	[MWh]
Objekte aufheizen	35	100	91	Alu	75	0.9	6.14	1.71	25.6	102
Traversen aufheizen	35	100	91	Stahl	50	0.46	2.09	0.58	8.7	35
Kette aufheizen	35	100	91	Stahl	35	0.46	1.47	0.41	6.1	24
Wasser aufheizen	35	100	65	Wasser	2	4.19	0.54	0.15	2.3	9
Wasser verdunsten	100	100	-70	Wasser	2	2'257 kJ/kg	4.51	1.25	18.8	75
Wärmeverlust durch offene Türen	100	20	150	Luft	13'000 m3/h	1.15 kJ/m3.K	49.92	13.87	208.0	832
Wärmeverluste durch Transmission	100	20	150	Wärme	130 m2	2.00 W/m2.K	9.34	2.60	38.9	156
Total Thermoöl									308	1234

Pinchlight-Analyse Ramseier Rubigen										DM Energieberatung AG
Alte Anlage										
Einbrennofen										
Energieflüsse für Leistungsberechnung	Anfangstemp.	Endtemp.	Differenz	Medium	Menge	spez. Wärme	Energienmenge pro Batch		mittlere Leistung	jährliche Energiemenge
	[°C]	[°C]	[°C]		[kg]	[kJ/kg.K]	[MJ]	[kWh]	[kW]	[MWh]
Objekte aufheizen	20	195	175	Alu	75	0.9	11.81	3.28	49.2	197
Traversen aufheizen	20	195	175	Stahl	50	0.46	4.03	1.12	16.8	67
Kette aufheizen	20	195	175	Stahl	35	0.46	2.82	0.78	11.7	47
Wärmeverlust durch offene Türen	195	20	175	Luft	15'000 m3/h	1.15 kJ/m3.K	67.20	18.67	280.0	1'120
Wärmeverluste durch Transmission	195	20	175	Wärme	187 m2	1.50 W/m2.K	11.79	3.27	49.1	196
Total Nutzenergie									407	1'627

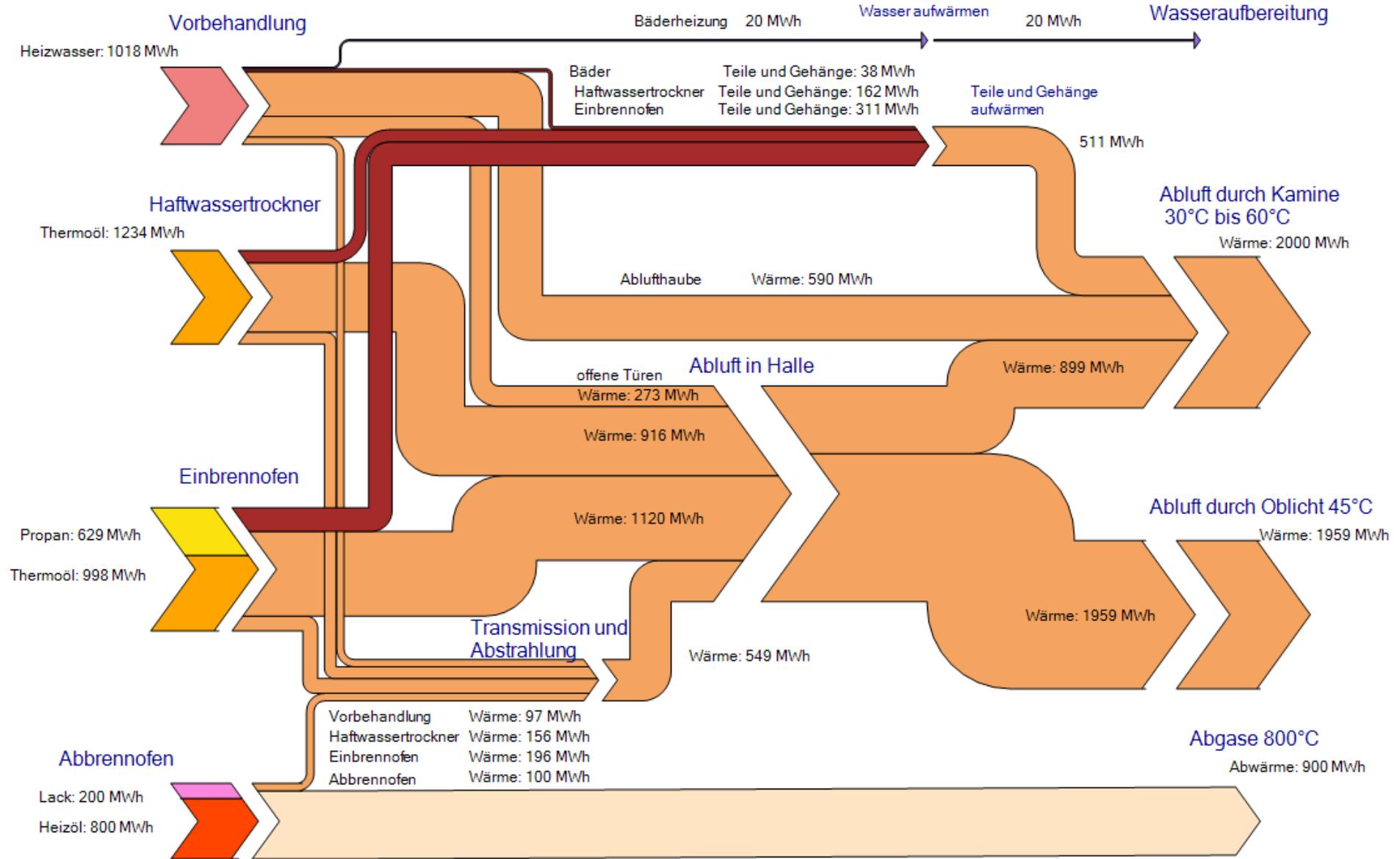
Massnahmenansatz	Anpassen Torschliessung (MINR156)																																												
Beschreibung	Anpassen der Torschliessung bei automatischen Toren und Instruktion des Personals bei manuellen Toren zur raschen Torschliessung nach Gebrauch.																																												
Algorithmus	<p>Auswahl Raumtemperatur (T_R)/Heizgrenze (T_{HG}), Heiztage (HT) sowie der Durchschnittlichen HT-Temperatur in Abhängigkeit der Klimaregion:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Klimaregion</th> <th>T_R/T_{HG} [°C]</th> <th>Heiztage HT [d/a]</th> <th>HT-Temp. (T_{HT}) [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">Alpin</td> <td>18/10</td> <td>276</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>20/12</td> <td>306</td> <td>1.7</td> </tr> <tr> <td>22/14</td> <td>332</td> <td>2.6</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Mittelland</td> <td>18/10</td> <td>191</td> <td>2.8</td> </tr> <tr> <td>20/12</td> <td>224</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>22/14</td> <td>257</td> <td>5.2</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Wallis</td> <td>18/10</td> <td>177</td> <td>3.4</td> </tr> <tr> <td>20/12</td> <td>204</td> <td>4.4</td> </tr> <tr> <td>22/14</td> <td>258</td> <td>7.0</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Tessin</td> <td>18/10</td> <td>156</td> <td>4.6</td> </tr> <tr> <td>20/12</td> <td>182</td> <td>5.5</td> </tr> <tr> <td>22/14</td> <td>209</td> <td>6.5</td> </tr> </tbody> </table> $\Delta Q_{th} = dV * \rho_{a,i} * c_L * (T_R - T_{HT}) * HT * \Delta t_B * \frac{n_A}{365}$ <p>mit: $dV = F_\phi * \frac{2}{3} * b * \sqrt{2 * 9.81 * (\rho_{La} - \rho_{Li}) * \frac{\rho_{La}}{\rho_{a,i}^2} * (z_n)^3}$</p> <p>mit: $\rho_{a,i} = \frac{\rho_{La} + \rho_{Li}}{2}$</p> <p>mit: $z_n = h * \frac{\rho_{Li}^{\frac{1}{3}}}{\rho_{La}^{\frac{1}{3}} + \rho_{Li}^{\frac{1}{3}}}$</p> <p>mit: $F_\phi = 0.4 + 0.0045 * (T_R - T_{HT})$, wobei: $0.5^\circ\text{C} < (T_R - T_{HT}) < 40^\circ\text{C}$</p> <p>mit: $\rho_{Li} = \frac{\rho_L * 273}{273 + T_R}$ und $\rho_{La} = \frac{\rho_L * 273}{273 + T_{HT}}$</p> <p> ΔQ_{th} = Jährliche thermische Nutzenergieeinsparung [kWh] b = Breite des Tores [m] h = Höhe des Tores [m] ρ_{La} = Dichte der Aussenluft [kg/m³] ρ_{Li} = Dichte der Innenluft [kg/m³] $\rho_{a,i}$ = Mittlere Dichte der Luft [kg/m³] ρ_L = Dichte der Luft bei Normalbedingungen (0°C/1.013bar): 1.275 [kg/m³] dV = Luftaustauschvolumenstrom [m³/s] c_L = Spezifische Wärmekapazität Luft: 1 [kJ/kg/K] T_R = Raumtemperatur [°C] T_{HT} = Durchschnittliche Heiztagtemperatur gemäss Klimaregion und T_R/T_{HG} [°C] HT = Heiztage der entsprechenden Klimaregion und T_R/T_{HG} [d/a] Δt_B = Tägliche Reduktion der Öffnungsdauer der Tore [h/d] n_A = Anzahl jährliche Arbeitstage [d/a] F_ϕ = Öffnungsbeiwert [-] z_n = Höhe der Neutralebene [m] </p>	Klimaregion	T_R/T_{HG} [°C]	Heiztage HT [d/a]	HT-Temp. (T_{HT}) [°C]	Alpin	18/10	276	0.7	20/12	306	1.7	22/14	332	2.6	Mittelland	18/10	191	2.8	20/12	224	4.0	22/14	257	5.2	Wallis	18/10	177	3.4	20/12	204	4.4	22/14	258	7.0	Tessin	18/10	156	4.6	20/12	182	5.5	22/14	209	6.5
Klimaregion	T_R/T_{HG} [°C]	Heiztage HT [d/a]	HT-Temp. (T_{HT}) [°C]																																										
Alpin	18/10	276	0.7																																										
	20/12	306	1.7																																										
	22/14	332	2.6																																										
Mittelland	18/10	191	2.8																																										
	20/12	224	4.0																																										
	22/14	257	5.2																																										
Wallis	18/10	177	3.4																																										
	20/12	204	4.4																																										
	22/14	258	7.0																																										
Tessin	18/10	156	4.6																																										
	20/12	182	5.5																																										
	22/14	209	6.5																																										
Quelle	Grundlagen Raumströmung, Forschungsprogramm ERL																																												
Bemerkungen/Hinweise	Durchschnittliche Aussenlufttemperaturen nach Mittelwerten verschiedener Wetterstationen der entsprechenden Klimaregion aus sia 381/2.																																												

Anhang 4: Energieflussdiagramme

Wärmeerzeugung



Wärmebezug



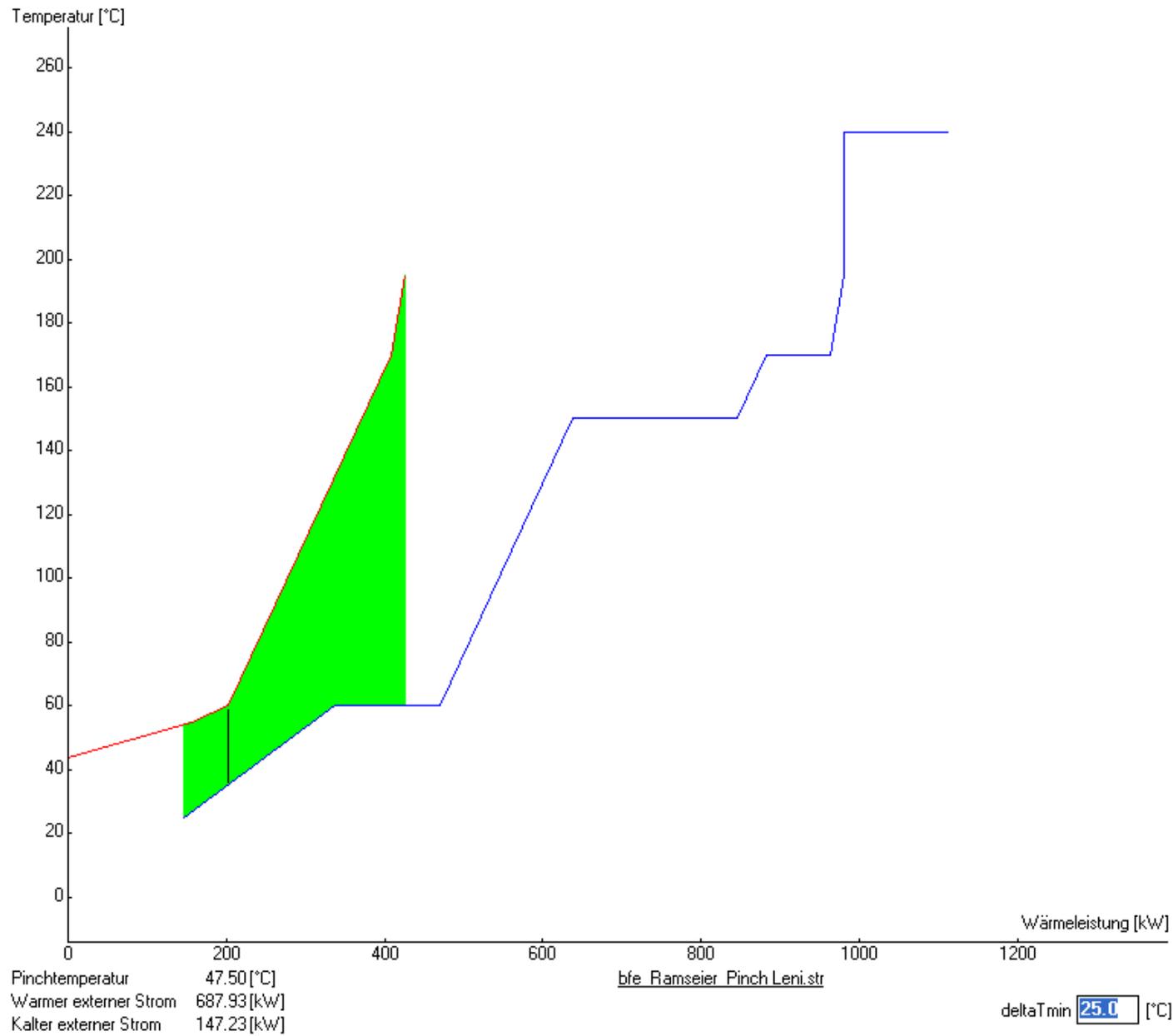
Anhang 5: Energie- und Masseströme für die Pinch-Analyse

Prozessbedingungen Ramseier											
Angaben lt. Bericht Pinchanalyse Ramseier AG DM Energieberatung AG		Produktionsdaten								Datentabelle alpha	
		Arbeitszeit im Jahr	4950 h						Abluft		50
		Maschinenlaufzeit	4000 h/a						Abluft kond		100
		Kosten Braunkohle	15 Eur/MWh						Brüden		5000
		Kosten Gas	27 Eur/MWh						Dampf		5000
		Kosten Elektrizität	61 Eur/MWh						Thermoöl		1500
Legende:		Raumtemperatur	25 °C						Wasser		2000
- Eingabefelder		Batchzeit	4 Minuten						Zuluft		50
- Berechnungsfelder		Batches pro h	15 Batches/h								
				50 Wochen pro Jahr							
				5.5 Tage pro Woche							
				18 Stunden pro Tag							
Energieträger	Verfahrensschritt/Anlagebezeichnung	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	M Flow [kg/h]	M Flow [kg/s]	V Flow [m ³ /h]	rho[kg/m ³]	Pressure [bar]	Alpha [W/(m ² ·Cp [kJ/(kg·K)]	Leistung [kW]	CP [kW/K]
Wasser	Entfetten (Heizregister)	60	61	59'651	16.57		990	1.00	2000	4.18	69.3
Abluft	Entfetten (Kamin)	55	25	10'735	2.98	9'500	1.13	1.00	100	1.65	-147.4
Zuluft	Entfetten (Zuluft)	25	60	12'110	3.36	10'717	1.13	1.00	50	1.00	117.7
Total aufheizen											187.0
Wasser	Chromatieren (Heizregister)	60	61	54'273	15.08		990	1.00	2000	4.18	63.0
Abluft	Chromatieren (Tür offen)	60	25	687	0.19	1'217	1.13	1.00	100	8.17	-54.6
Zuluft	Chromatieren (Zuluft)	25	60	687	0.19	1'217	1.13	1.00	50	1.00	6.7
Total aufheizen											69.7
Thermoöl	Haftwassertrocknung (Thermoöl)	150	151	370'490	102.91		750	1.00	1500	2.50	257.3
Abluft	Haftwassertrocknung (offene Türen, incl W)	170	25	2'448	0.68	4'333	1.13	1.00	50	1.01	-99.6
Zuluft	Haftwassertrocknung (Zuluft)	25	170	2'493	0.69	4'413	1.13	1.00	50	1.01	50.7
Total aufheizen											308.0
Propan	Angelierung (Infrarot)	170	171	170'756	47.43		2	1.00	10000	1.70	80.6
Abluft	Angelierung (Tür öffnen)	170	25	1'883	0.52	3'333	1.13	1.00	50	1.01	-76.6
Zuluft	Angelierung (Zuluft)	25	170	1'883	0.52	3'333	1.13	1.00	50	1.01	76.6
Total aufheizen											157.3
Thermoöl	Einbrennofen (Thermoöl)	200	201	191'128	53.09		750	1.00	1500	2.50	132.7
Abluft	Einbrennofen (Tür öffnen)	195	25	2'448	0.68	4'333	1.13	1.00	50	1.01	-116.8
Zuluft	Einbrennofen (Zuluft)	25	195	2'448	0.68	4'333	1.13	1.00	50	1.01	116.8
Total aufheizen											249.5
Abluft	Auskühlzone 2 (Abluft aus Halle)	60	25	22'600	6.28	20'000	1.13	1.00	50	1.01	-221.9
Abluft	Auskühlzone 2 (Auskühlkammer)	60	25	1'017	0.28	900	1.13	1.00	50	1.01	-10.0
Total abkühlen											-231.9

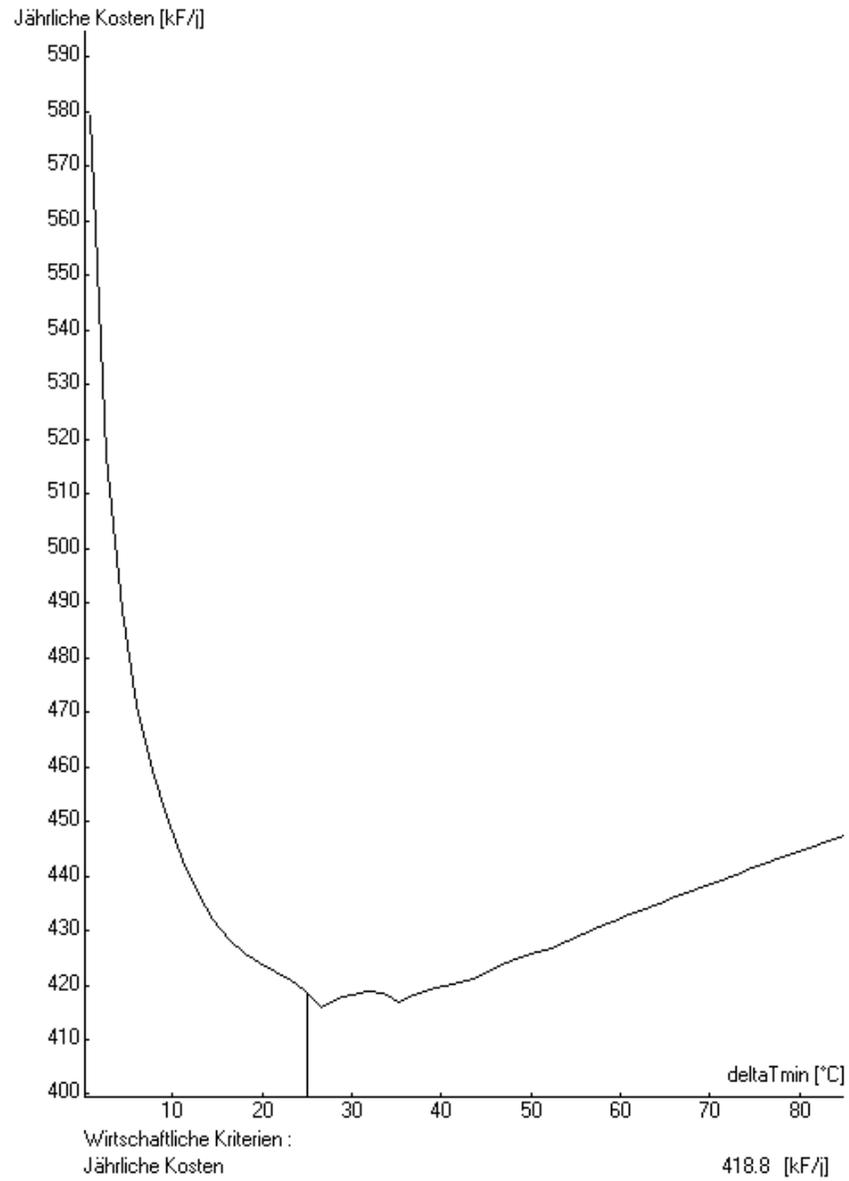
Anhang 6: Stromtabelle des Full Pinch

&a	Tin [°C]	Tout [°C]	M Flow [kg/s]	Cp [kJ/(kg.K)]	Pressure [bar]	Alpha [W/(m2.K)]
	60	60.01	1	6926.18	1	800
	55	44	2.98	1.65	1	100
	25	60	3.36	1	1	50
	60	60.01	1	6301.68	1	800
	60	44	0.19	4.08	1	100
	25	60	0.19	1	1	50
	150	150.01	1	20656.93	1	1500
	170	44	0.68	1.01	1	50
	25	170	0.68	1.01	1	50
	170	170.01	1	8060	1	50
	170	44	0.52	1.01	1	50
	25	170	0.52	1.01	1	50
	240	240.01	1	13272.81	1	1500
	195	44	0.68	1.01	1	50
	25	195	0.68	1.01	1	50
	60	44	6.28	1.01	1	50
	60	44	0.28	1.01	1	50
	250	249	UTIL	WATER	1	20000
	10	11	UTIL	WATER	1	20000

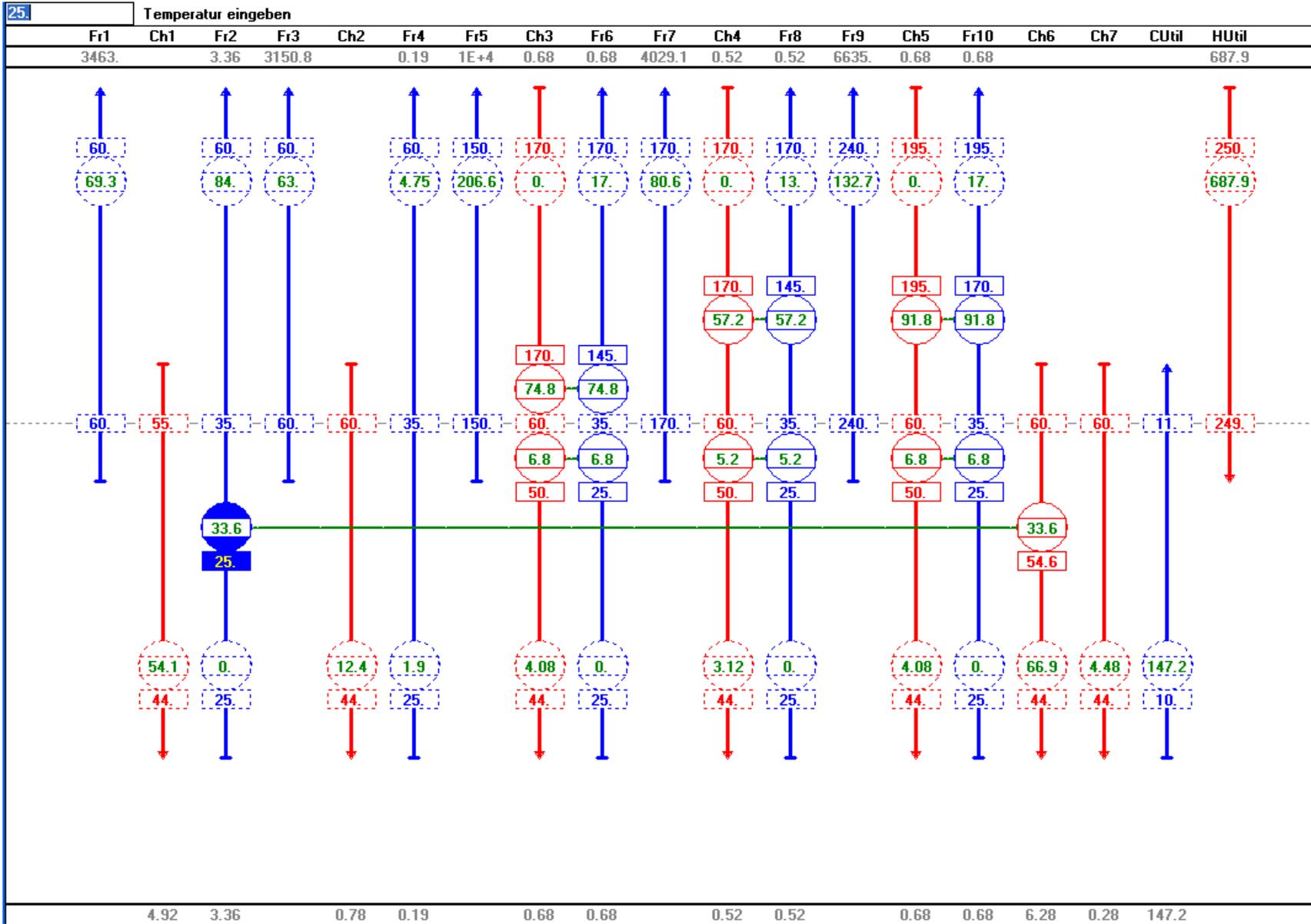
Anhang 7: Composite Curve des Full Pinch



Anhang 8: Kostenkurve der Full Pinch Analyse



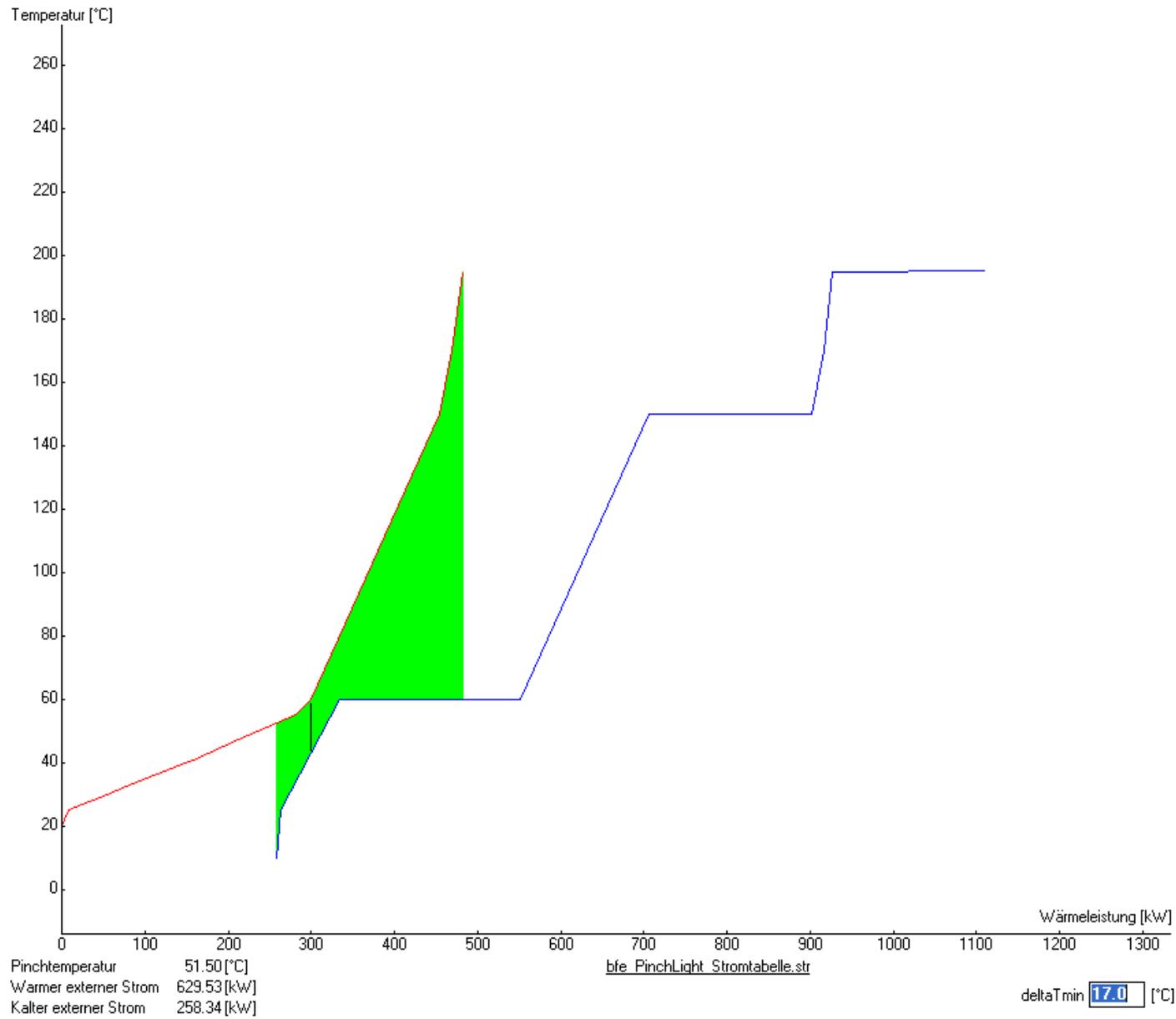
Anhang 9: Wärmetauscher-Netzwerk



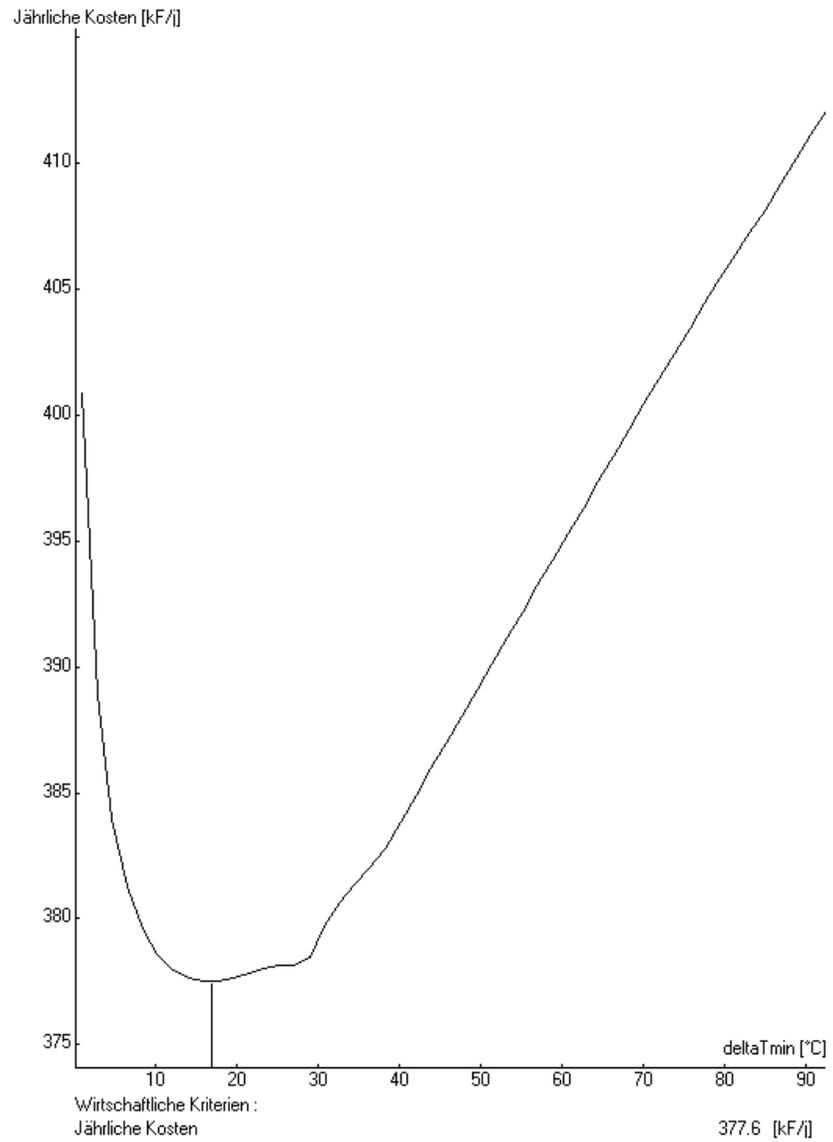
Anhang 10: Stromtabelle aus den Software Modulen

&a	tin	tout	m	cp	p	a	comment				
	55	25	1	3.0389	0	57	from	air_condenst_ha01.	to	air_condenst_ha01:	91.2
	60	30	1	5.81E-02	0	1136	from	discharge.	to	discharge:	1.7
	60	60.1	1	1529	0	135	from	utilty.	to	utilty:	-152.9
	10	60	1	0.19657	0	1136	from	make_up.	to	make_up:	-9.8
	55	47.5	1	2.7586	0	57	from	air_condenst_ha02.	to	air_condenst_ha02:	20.7
	47.5	40	1	1.9281	0	57	from	air_condenst_ha03.	to	air_condenst_ha03:	14.5
	40	32.5	1	1.3888	0	57	from	air_condenst_ha04.	to	air_condenst_ha04:	10.4
	32.5	25	1	1.0277	0	57	from	air_condenst_ha05.	to	air_condenst_ha05:	7.7
	60	30	1	8.36E-03	0	1136	from	discharge.	to	discharge:	0.3
	60	60.1	1	648.57	0	135	from	utilty.	to	utilty:	-64.9
	10	60	1	0.11161	0	1136	from	make_up.	to	make_up:	-5.6
	150	150.1	1	1957.8	0	1136	from	new_utilty_load.	to	new_utilty_load:	-195.8
	25	150	1	0.91914	1	10000	from	hotair.	to	hotair:	-114.9
	150	25	1	0.92339	1	10000	from	metal_dryer_ex_air.	to	metal_dryer_ex_air:	115.4
	41	25	1	1.71	0	57	from	cooling_medium_out.	to	cooling_medium_out:	27.4
	195	195.1	1	1846.9	0	1136	from	oven_part2.	to	oven_part2:	-184.7
	25	170	1	0.40798	1	9087	from	oven_h_air01.	to	oven_h_air01:	-59.2
	170	25	1	0.30353	1	9087	from	oven_h_air10.	to	oven_h_air10:	44.0
	195	25	1	0.48899	1	9087	from	oven_h_air20.	to	oven_h_air20:	83.1
	25	195	1	0.38425	1	9087	from	oven_h_air02.	to	oven_h_air02:	-65.3
	60	20	1	1.6365	0	57	from	cooling_medium_out.	to	cooling_medium_out:	65.5
	250	249	UTIL	WATER	1	20000					
	10	11	UTIL	WATER	1	20000					

Anhang 11: Composite Curve aus Daten der Software Module

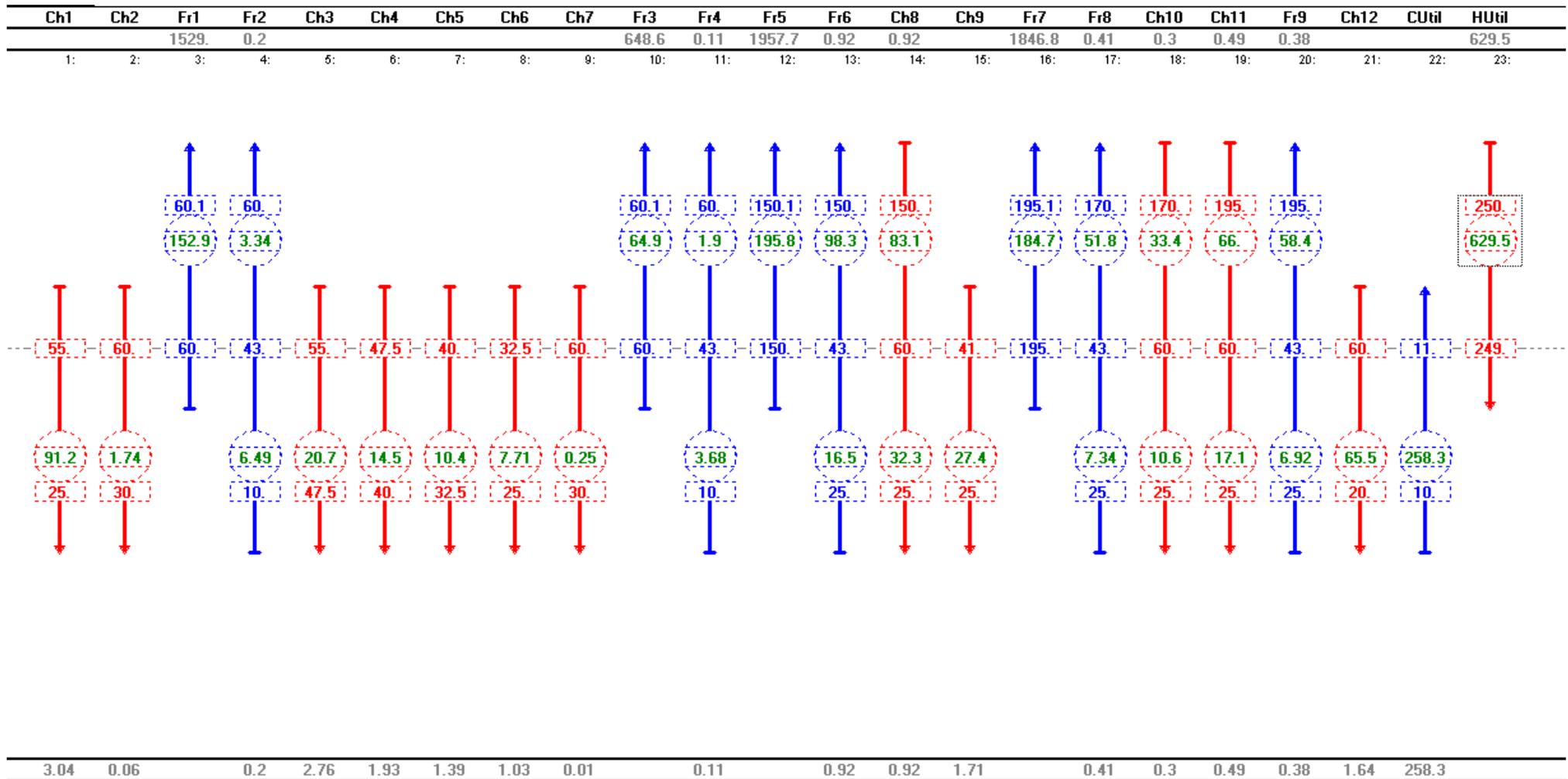


Anhang 12: Kostenkurve aus Daten der Software Module



Anhang 13: Wärmetauscher-Netzwerk aus Daten der Software Module

Prozessströme ohne Wärmetauscher



Prozessströme mit Wärmetauscher-Netzwerk

Ch1	Ch2	Fr1	Fr2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Fr3	Fr4	Fr5	Fr6	Ch8	Ch9	Fr7	Fr8'	Fr8	Fr8''	Ch10	Ch11'	Ch11	Ch11''	Fr9	Ch12	CUtil	HUtil
		1529	0.2						648.6	0.11	1957.7	0.92	0.92		1846.8		0.41		0.3	0.11		0.38	0.38			629.9
1:	2:	3:	4:	5:	6:	7:	8:	9:	10:	11:	12:	13:	14:	15:	16:	26:	17:	27:	18:	24:	19:	25:	20:	21:	22:	23:

