

Zürich, 12. August 2013

## **Metal Paint AG**

### **Schlussbericht Pinch-Analyse**

#### **Inhalt**

Zusammenfassung und Empfehlung	2
1. Ausgangslage	4
2. Analyse der Energieströme	5
3. Massnahmen	20
Anhang	24

## Zusammenfassung und Empfehlung

Die Firma Metal Paint AG hat sich durch das KMU-Modell der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) zum Energie- und CO<sub>2</sub>-Sparen verpflichtet. Die angestrebten Einsparungen basieren auf sechs Massnahmen, welche innerhalb der nächsten 10 Jahre umgesetzt werden sollen. Die Wärmerückgewinnung des Lackierofens bedarf der besonderen Aufmerksamkeit, denn diese Massnahme trägt 85% der Energieeinsparung und 100% der CO<sub>2</sub>-Einsparung zum gesamten Einsparungspotenzial bei.

In der jetzigen Situation, ohne Wärmerückgewinnung, wird die Abluft aus dem Lackierofen in die Thermische Nachverbrennung (TNV) geleitet, und dort zusammen mit dem Treibstoff Propan verbrannt. Im Kamin nach der TNV ist der Rauchgasstrom noch ca. 430°C heiss. Diese Wärmeenergie soll nun genutzt werden.

Aufgrund der TNV ist grundsätzlich ein sehr grosses Abwärmepotenzial in der Firma vorhanden. Damit dieses optimal genutzt werden kann, soll die vorgesehene Massnahme sorgfältig geplant und alle Energieströme des Unternehmens in die Analyse mit einbezogen werden. Für die Optimierung von mehreren Energieströmen ist die Pinch-Analyse das geeignete Instrument.

In einem ersten Schritt wurden die fehlenden Werte der Energieströme durch Messungen in Erfahrung gebracht. Dies erlaubte in einem nächsten Schritt die Definition von Energieströmen in mehreren Varianten. Die Auswertung dieser Ströme gemäss der Pinch-Methode zeigt in der Folge, welche Ströme in die Wärmerückgewinnung integriert werden können. Grundsätzlich wurde anhand der sogenannten Verbundkurven festgestellt, dass sich die vorhandenen Energieströme hervorragend für eine Wärmerückgewinnung eignen.

Die vorhandene Abwärme-Menge des Abgases ist bei allen betrachteten Varianten genug hoch, um damit die beiden Bäder der Prozessschritte "Entfetten" und "Spülen" zu beheizen. Beim elektrischen Trocknungsofen wurde dagegen festgestellt, dass der Energiebedarf zu klein wäre, um eine eigene Wärmerückgewinnung zu rechtfertigen. Beim zweiten, gasbetriebenen Trocknungsofen wiederum wäre eine Wärmerückgewinnung denkbar.

Bei der Integration des Lackierofens müssen verschiedene Varianten bedacht werden. Je nachdem können zwischen 60% und über 90% des gesamten Energiebedarfs des Ofens durch Abwärme gedeckt werden. Die Schlitzluft, die direkt in Ofenzone 4 gelangt, kann aber in keinem Fall durch Wärmerückgewinnung geheizt oder kompensiert werden. Diese Luft muss weiterhin indirekt durch den Gasbrenner in der Zone 4 aufgeheizt werden.

Die Pinch-Analyse hat auch gezeigt, dass nicht die gesamte Kühlung des Metallbandes, sondern höchstens Teile davon für eine Wärmerückgewinnung genutzt werden könnten. Da dafür aber drei Wärmetauscher nötig wären, die allesamt eine eher kleine Leistung hätten, ist dies ungünstig. Der Aufwand pro Wärmetauscher im Vergleich zu dessen Nutzen würde dadurch relativ gross. Weiter wurde ersichtlich, dass es innerhalb des Prozesses gar keine genug tiefen Temperaturen gibt, mit denen eine Kühlung auf die nötige Temperatur möglich wäre. Ein Teil der Kühlung muss in jedem Fall durch ein Kühlmedium sichergestellt werden.

Aufgrund der obigen Befunde und den betrachteten Varianten wird empfohlen, die Wärmerückgewinnung auf den Betrieb mit einer regenerativen Nachverbrennung (RNV) auszulegen, die Anlage aber bis auf weiteres trotzdem noch mit der TNV zu betreiben. Der Schritt von TNV zu RNV kann auch in ein paar Jahren noch umgesetzt werden. Diese Lösung hat den Vorteil, dass damit die langfristig grösstmögliche Einsparung erzielt werden

kann, und dass die Investitionskosten auf zwei Projekte (Wärmerückgewinnung, Ersatz TNV) aufgeteilt werden können.

Der Energieverbrauch und der CO<sub>2</sub>-Ausstoss können durch die Umsetzung der Wärmerückgewinnung um mehr als 40% reduziert werden. Dank der Rückerstattung der CO<sub>2</sub>-Abgabe, die ebenfalls durch das Umsetzen dieser Massnahmen ermöglicht wird, beträgt die Kosteneinsparung sogar über 50% im Vergleich zu den momentanen jährlichen Kosten für Strom und Propan.

Die Energieeinsparungen betragen jährlich ca. 3.5 GWh, die Emissionseinsparungen ca. 700 tCO<sub>2</sub> und die Kosteneinsparungen über CHF 400'000.-. Beim Vergleich von diesen Einsparungen mit den Investitionskosten ergibt sich damit ein Payback von zwei Jahren.

Durch eine spätere Umrüstung auf eine RNV könnten weitere Einsparungen erzielt werden, sodass die gesamten Einsparungen schlussendlich ca. 65% des heutigen Energieverbrauchs, CO<sub>2</sub>-Ausstosses und der Energiekosten betragen würden.

Die Pinch-Analyse wurde durch das Bundesamt für Energie finanziell unterstützt. Diese Förderung möchten wir an dieser Stelle verdanken.

## 1. Ausgangslage

Seit 1990 ist die Firma Metal Paint AG eines der führenden Unternehmen in der Schweiz auf dem Gebiet der Bandbeschichtung und dem Längsteilen von lackierten und unlackierten Spaltbändern. Bandbeschichtung (Coil-Coating) ist ein industrielles Verfahren, in dem gewalzte Stahl- und Aluminiumbänder kontinuierlich organisch beschichtet werden. Pro Jahr werden rund 3'465 Tonnen Stahl- und Aluminiumbänder verarbeitet. Produziert wird im Zwei- bis Drei-Schichtbetrieb.

Die Firma hat sich durch das KMU-Modell der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) zum Energie- und CO<sub>2</sub>-Sparen verpflichtet. Die angestrebten Einsparungen basieren auf sechs Massnahmen, welche innerhalb der nächsten 10 Jahre umgesetzt werden sollen. Die Wärmerückgewinnung des Lackierofens bedarf der besonderen Aufmerksamkeit, denn diese Massnahme trägt 85% der Energieeinsparung und 100% der CO<sub>2</sub>-Einsparung zum gesamten Einsparungspotenzial bei. Erste Berechnungen haben gezeigt, dass die Massnahme wirtschaftlich umgesetzt werden kann. Zudem ist ein Förderbeitrag der Klimastiftung Schweiz zugesichert worden, die derartige Massnahmen mit einem Betrag von CHF 30.- pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub> unterstützt.

In der jetzigen Situation, ohne Wärmerückgewinnung, wird die Abluft aus dem Lackierofen in die Thermische Nachverbrennung (TNV) geleitet, und dort zusammen mit dem Treibstoff Propan verbrannt. Im Kamin nach der TNV ist der Rauchgasstrom noch ca. 430°C heiss. Diese Wärmeenergie soll nun genutzt werden, um den Frischluftstrom vor Eintritt in den Ofen zu erwärmen. Dies kann mittels eines Luft/Luft Wärmetauschers erreicht werden. Dadurch wird der Propanverbrauch im Ofen vermindert, was zu erheblichen Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen führt.

Durch die TNV ist grundsätzlich ein sehr grosses Abwärmepotenzial in der Firma vorhanden. Damit dieses optimal genutzt werden kann, soll die vorgesehene Massnahme sorgfältig geplant und alle Energieströme des Unternehmens in die Analyse mit einbezogen werden. Für die Optimierung von mehreren Energieströmen ist die Pinch-Analyse das geeignete Instrument.

## 2. Analyse der Energieströme

### 2.1 Annahmen

Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- Es werden dieselben Energiepreise wie im Checkup-Tool des KMU-Modells verwendet: Der Strompreis beträgt 17 Rp./kWh und der Wärmepreis 9.1 Rp./kWh.
- Der Emissionsfaktor von Propan beträgt 232.534 kg/MWh.
- Es wurden 5'000 Betriebsstunden pro Jahr angenommen. Diese ergeben sich aus der Differenz der ca. 6'000 effektiven Schichtstunden und den rund 1'000 Stunden, die davon für Farbwechsel und Reinigung der Anlage aufgewendet werden müssen und während denen folglich die Bandbeschichtungsanlage still steht.

### 2.2 Varianten

Bei der Definition der Energieströme und deren Auswertung wurden verschiedene Varianten betrachtet. Zum einen hat die zulässige Höchsttemperatur des Frischluftkanals einen Einfluss, sodass sich als Variante der Ersatz dieses Kanals aufdrängt. Zum anderen gilt es zu bedenken, dass die bestehende TNV in einigen Jahren ersetzt werden muss. Für diesen Ersatz drängt sich eine sogenannte Regenerative Nachverbrennung (RNV) auf, da dieses Verfahren besonders effizient ist. Es besteht somit auch die Möglichkeit, im Zuge der Umsetzung der Wärmerückgewinnung einen vorzeitigen Ersatz der TNV vorzunehmen, falls das durch die zusätzlichen Einsparungen zu rechtfertigen ist.

### 2.3 Prozessbeschreibung

Die Bandbeschichtung durchläuft verschiedene Stufen, welche in Abbildung 1 dargestellt und im Folgenden kurz beschrieben werden:

#### Entfetten

Das Metallband wird entfettet, indem es mit warmer Lauge bespritzt wird. Die Lauge wird in einem Zirkulationskreislauf aus dem Bad 1 gepumpt. Der Energiebedarf dieses Prozessschrittes besteht darin, dass das Bad 1 auf eine Temperatur von ca. 55°C geheizt werden muss.

#### Spülen

In diesem Schritt wird die Lauge vom Metallband entfernt, indem es mit warmem Wasser bespritzt wird. Ähnlich wie beim Entfetten wird auch hier die Flüssigkeit in einem Zirkulationskreislauf aus dem Bad 2 gepumpt. Das Bad 2 muss auf ca. 40°C gewärmt werden.

#### Trocknen

Es gibt zwei kleinere Öfen, die das nasse Band vor dem Lackieren trocknen. Als erstes einen Elektroofen, ca. 60°C heiss, und zusätzlich einen Gasofen, der ca. 120°C heiss ist.

#### Beschichtung/Lackierung

Der in der Lackierkabine aufgebraute flüssige Lack wird in den vier Ofenzonen gehärtet und verbindet sich mit dem Metallband. Die vier Ofenzonen werden auf Temperaturen zwischen 140°C und 285°C geheizt.

#### Kühlung

Die Kühlung des Metallbandes auf ca. 30°C erfolgt in zwei Stufen, zuerst wird mit Luft, dann mit Wasser gekühlt. Der Kühlwasserkreislauf seinerseits ist auch mit Luft gekühlt.

Auch die Luftströme durch den Lackierofen durchlaufen mehrere Stationen:

Frischlufte → Lackierkabine

Die Frischlufte wird als erstes in die Lackierkabine eingeblasen. Im Winter erfolgt dadurch schon eine erste Erwärmung der Aussenluft.

Lackierkabine → Lackierofen

Die Zuluft für den Lackierofen wird aus der Lackierkabine abgesaugt. Dadurch entsteht in der Lackierkabine ein hoher Luftwechsel, der die Dämpfe der Flüssiglacke in der Lackierkabine teilweise mitträgt. Im Lackierofen wird die Luft durch die Mischung mit heisser Luft und eine Umwälzung über den Brenner bis zur geforderten Temperatur aufgeheizt.

Lackierofen → TNV

Die Abluft aus den vier Ofenzonen enthält noch zu viele Schadstoffe, deshalb wird eine Thermische Nachverbrennung in einem separaten Ofen durchgeführt. Die Abluft wird dort bis ca. 700°C aufgeheizt. Die Schadstoffkonzentration kann dadurch verringert werden.

TNV → Kamin

In der TNV ist ein Wärmetauscher integriert, der die Abgase von 700°C auf ca. 430°C kühlt. Mit dieser Temperatur strömt das Abgas in den Kamin.

# Prinzipschema Metal Paint AG

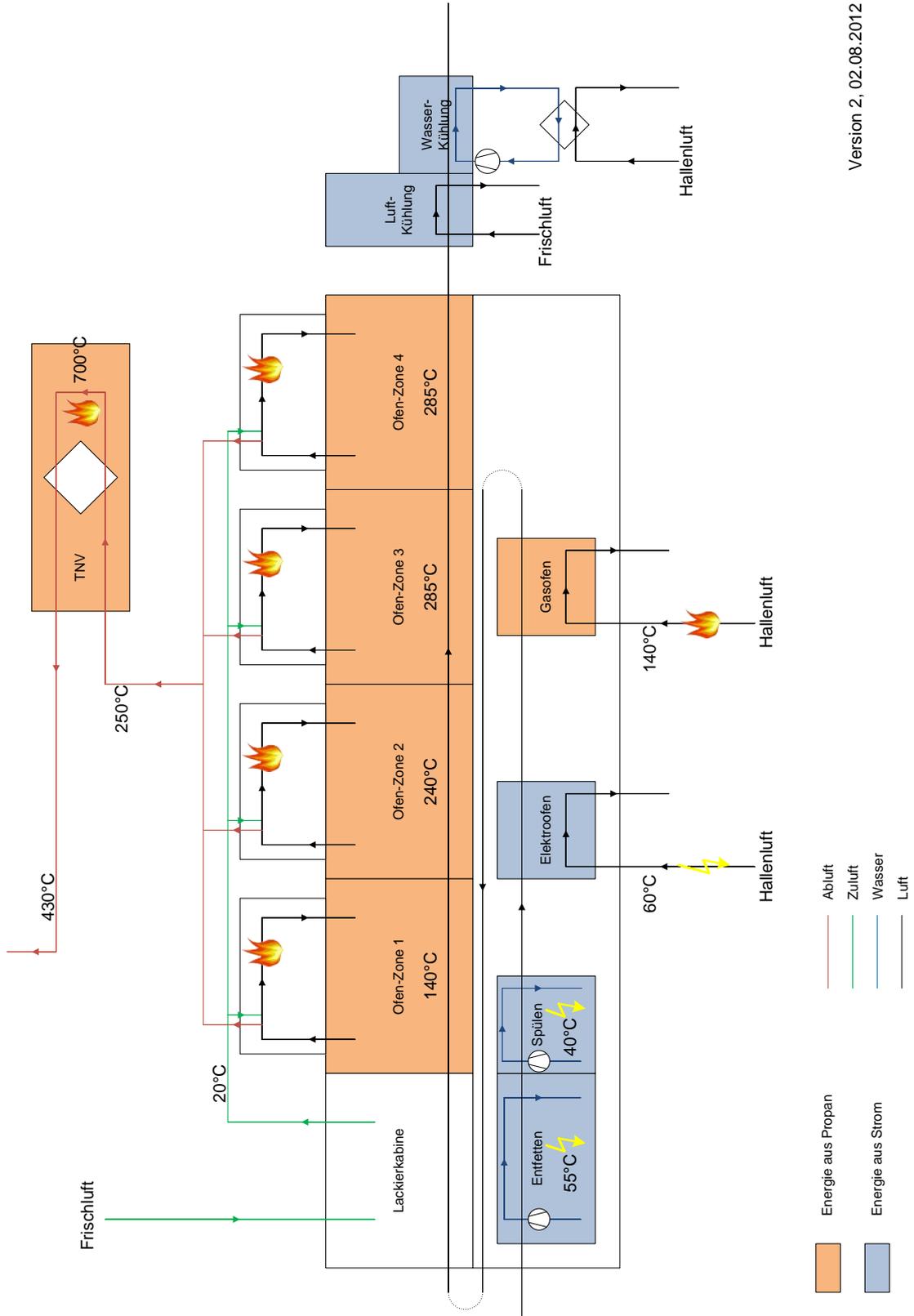


Abbildung 1: Prinzipschema mit ungefähren Temperaturangaben

## 2.4 Messungen

### 2.4.1 Bäder Heizung

Die elektrische Heizung von Bad 1 wurde vom Elektriker gemessen, die Resultate sind in Abbildung 5 zu sehen. Daraus geht hervor, dass die Heizung im Ein/Aus Betrieb geschaltet wird, und während der Betriebszeit des Ofens je ca. 50% eingeschaltet und ausgeschaltet ist. Die elektrische Leistung beträgt ca. 140 kW, im Durchschnitt beträgt der Wärmebedarf von Bad 1 folglich ca. 70 kW.

Der Wärmebedarf von Bad 2 konnte nicht gemessen werden, da die elektrische Heizung dort nicht mehr funktioniert.

### 2.4.2 Elektroofen

Der Verbrauch des Elektroofens wurde ebenfalls vom Elektriker gemessen, siehe Abbildung 6. Der Verbrauch während der Betriebszeit beträgt konstant 11 kW.

### 2.4.3 Luftströme

Die Luftströme rund um den Lackierofen und die TNV stellen bei der Firma Metal Paint die grössten Energieströme dar. Es ist deshalb besonders wichtig, sie zu kennen. Dafür wurden umfassende Messungen der Luftströme vorgenommen. Die wichtigsten Resultate dieser Messungen (Massenströme), sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Temperaturen der Ströme wurden jeweils auch gemessen. Die vollständigen Messdaten sind im Anhang, Tabelle 9, aufgeführt.

#### **Gemessene Daten**

		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Total
Zuluft (Frischlufte)	Nm <sup>3</sup> /h					
Schlitzluft	Nm <sup>3</sup> /h					
Total Zuluft	Nm <sup>3</sup> /h					
Verbrennungsluft	Nm <sup>3</sup> /h					
Total aufzuwärmende Luft	Nm <sup>3</sup> /h					
Abluft	Nm <sup>3</sup> /h					

Tabelle 1: Messdaten Luftströme

#### Begriffliche und rechnerische Definition der Luftströme

##### Zuluft (Frischlufte)

Die Zuluft oder Frischluft wird über einen Kanal, der oberhalb des Ofens verläuft, zu den Ofenzonen 1 bis 4 gebracht. Von diesem Kanal aus gibt es pro Zone mehrere Luftauslässe in den Ofen.

Um bei dieser Anordnung die Luftströme zu den einzelnen Zonen zu ermitteln, wurde der Luftstrom im Zuluftkanal an verschiedenen Stellen gemessen. Zuerst wurde der gesamte Zuluftstrom für alle Ofenzonen, danach weiter stromabwärts der verbleibende Luftstrom für die Zonen 2 bis 4, usw., gemessen. Der Zuluftstrom zu Zone 1 zum Beispiel berechnet sich dadurch als "Zuluftstrom für alle Zonen minus Zuluftstrom für Zonen 2 bis 4".

### Schlitzluft

Die Schlitzluft bezeichnet den Luftstrom, der nicht durch den Zuluftkanal, sondern direkt durch die seitlichen Öffnungen in den Ofen eintritt. Diese seitlichen Öffnungen bei Zone 1 und 4 sind notwendig, damit das zu lackierende Metallband in den Ofen hinein und hinausgeführt werden kann.

Die Schlitzluft tritt immer mit der in der Halle herrschenden Temperatur in den Ofen ein, und kann deshalb auch mit der Wärmerückgewinnung nicht vorgewärmt werden.

### Total Zuluft

Diese Luftmenge entspricht der Summe aus Zuluft und Schlitzluft. Die Messungen gemäss Tabelle 1 haben gezeigt, dass sich die totale Zuluft in den Zonen 1 und 4 zu einem sehr grossen Teil aus Schlitzluft zusammensetzt.

### Verbrennungsluft

Die Verbrennungsluft entspricht der Luftmenge, die von den Brennern angesaugt wird, um die Flamme mit Sauerstoff zu versorgen. Dieser Strom wurde berechnet, und zwar als Differenz der Abluft von allen Zonen und der totalen Zuluft von allen Zonen. Da es sich anteilmässig um einen kleinen Luftstrom handelt, wurde die berechnete Gesamtmenge gleichmässig auf die vier Ofenzonen verteilt.

### Total aufzuwärmende Luft

Diese Bezeichnung steht für die Summe aus der totalen Zuluft und der Verbrennungsluft. Die Summe über alle Zonen entspricht demzufolge auch wieder der Abluft aus allen Zonen. Die total aufzuwärmende Luft pro Zone entspricht der Luftmenge, die durch die entsprechende Zone fliesst und die Temperatur dieser Zone hat. Um die Funktion des Ofens zu gewährleisten, wird auch in Zukunft diese Menge an Luft mit dieser Temperatur durch die Ofenzonen fließen müssen und muss entweder durch die Wärmerückgewinnung oder die Brenner auf die Solltemperatur aufgewärmt werden.

### Abluft

Die Abluft bezeichnet die Luft, die aus dem Lackierofen zur TNV fliesst. Es wurde zwar eine Abluft pro Zone gemessen, diese lässt sich aber aufgrund der Strömungsverhältnisse in den Abluftkanälen nicht eindeutig einer Ofenzone zuordnen. Die Werte pro Zone werden deshalb nicht weiter verwendet, sondern nur der gesamte Abluftstrom.

## 2.5 Definition Energieströme

### Entfetter

Der gemessene Wärmebedarf von Bad 1 beträgt 70 kW. Da in Zukunft eher mit höheren Bandgeschwindigkeiten gefahren werden soll, steigt dadurch auch der Wärmebedarf. Es wird deshalb angenommen, dass der Bedarf ca. 80 kW betragen wird. Zusätzlich wird angenommen, dass mindestens ein 55°C heisser Strom nötig ist, um das Bad 1 auf der Solltemperatur von 50°C zu halten.

### Spülen

Der Wärmebedarf für Bad 2 muss aufgrund der fehlenden Messung abgeschätzt werden. Bad 2 ist einiges kleiner und die Temperatur tiefer. Da für Bad 2 nur ein elektrisches Heizmodul ausreichend ist, während bei Bad 1 vier solche Module nötig sind, wird der Wärmebedarf von Bad 2 auf einen Viertel des Bedarfs von Bad 1 geschätzt, also 20 kW.

### Elektroöfen

Der Energiestrom des Elektroofens wurde als Luftstrom mit der gemessenen Leistung von 11 kW, der Austrittstemperatur von 60°C sowie der angenommenen Eintrittstemperatur (entspricht der Hallentemperatur) von 20°C definiert.

### Gasöfen

Der Massenstrom des Gasofens wurde ebenfalls gemessen. Dieser Wert und die definierten Ein- und Austrittstemperaturen von 20°C resp. 120°C ergeben einen Wärmebedarf von 135 kW.

### Frischluff

Die Luftströme zu den vier Zonen werden auch in Zukunft nicht als einzelne Ströme in separaten Leitungen und unterschiedlichen Temperaturen ausgeführt sein. Der Aufwand für die dazu nötigen Wärmetauscher, Leitungen und Änderungen am Ofen wäre zu gross. Die Frischluft wird deshalb weiterhin als ein Strom geführt, von dem mehrere Abgänge zu den einzelnen Zonen führen.

Bei der Definition des Massenstromes muss folgendes beachtet werden: Die gemessenen Schlitzluftmengen sind sehr gross und in diesem Ausmass auch für den Prozess nicht erwünscht. Zudem hat die Schlitzluft, wie oben erwähnt, den Nachteil, dass sie nicht in die Wärmerückgewinnung eingebunden werden kann. Die Schlitzluft soll deshalb verringert werden (bei der Umsetzung der Wärmerückgewinnung muss aufgrund der geänderten Zulufttemperaturen sowieso eine Neueinstellung der Luftklappen gemacht werden). Es wird die Annahme gemacht, dass sich die Schlitzluft auf ### Nm<sup>3</sup>/h (Zone 1) und ### Nm<sup>3</sup>/a (Zone 4) verringern lässt. Die totale Zuluft pro Zone ist dagegen eine Prozessanforderung und bleibt bestehen. Das bedeutet, dass eine Verringerung der Schlitzluft eine Vergrösserung der Zuluft (Frischluff) im selben Ausmass zur Folge hat. Der so definierte Massenstrom entspricht also der Summe der Zuluft (Frischluff) pro Zone, unter Berücksichtigung der verringerten Schlitzluftmengen.

Bei der Definition der Temperatur, auf welche der Frischluftstrom aufgewärmt werden darf, müssen zwei Einschränkungen bedacht werden. Erstens darf die Temperatur die materialseitige Höchsttemperatur des Frischluftkanals nicht überschreiten. Beim bestehenden Kanal beträgt diese Temperatur ca. 200°C. Beim Ersatz könnte ein Material gewählt werden dessen erlaubte Höchsttemperatur über 300°C liegt. Zweitens darf in der Zone 1 die übliche Solltemperatur von 140° nicht überschritten werden. Diese Temperatur ergibt sich als Mischtemperatur der heissen Frischluft und der kalten Schlitzluft. Die Temperatur der Frischluft darf also durchaus über 140°C liegen, es muss jedoch das Verhältnis Frischluft/Schlitzluft berücksichtigt werden.

#### Variante: Beibehalten des Frischluftkanals

Wenn der bestehende Frischluftkanal weiter genutzt werden soll, ist dessen zulässige Höchsttemperatur die massgebende Beschränkung. Die Frischluft soll im Wärmetauscher höchstens bis 210°C erhitzt werden.

#### Variante: Ersetzen des Frischluftkanals

Bei dieser Variante ist die Temperatur in Zone 1 das begrenzende Element. Die Frischlufttemperatur darf nach dem Wärmetauscher nicht heisser als ca. 310°C sein, damit die Solltemperatur in Zone 1 gewährleistet werden kann. Auf dem Weg zwischen Wärmetauscher und den Ofenzonen wird mit etlichen Grad Verlust gerechnet. Deshalb stellt diese Temperatur auch für die nachfolgenden Zonen kein Problem dar.

## Kühlung

Die Leistung der Kühlung wurde berechnet als die Leistung, die notwendig ist, den durchschnittlichen "Metall-Strom" von 250°C auf 30°C zu kühlen. Diese Temperaturen sind Prozessanforderungen. Der durchschnittliche "Metall-Strom" wird aus den Spezifikationen des am häufigsten produzierten Bandes berechnet: Die Dichte dieses Bandes beträgt ### gr/m, die Bandgeschwindigkeit ### m/min, das heisst der Massenstrom beträgt ### kg Aluminium pro Minute. Die aus diesen Angaben ermittelte Kühlleistung beträgt 66 kW.

Um die Abwärme des Metalls zurückzugewinnen und an anderer Stelle wieder einzusetzen, eignet sich ein Wasserstrom besser als ein Luftstrom. Deshalb wurde dieser Energiestrom als Wasserstrom mit der oben berechneten Leistung definiert, der von 70°C auf 20° gekühlt werden muss. Damit dieser Strom das Metall bis auf 30°C kühlen kann, muss die Temperatur noch tiefer liegen. Mit einem angenommenen  $\Delta T$  von 10°C ergeben sich deshalb die 20°C. Die 70°C stammen aus der -zwar etwas vorgegriffenen, aber dennoch sinnvollen Überlegung - dass die Wärme wohl, falls möglich, bei den Bädern eingesetzt werden müsste. Damit dies möglich ist, muss die Temperatur sicher über 50°C liegen, damit ein Wärmefluss in die Bäder möglich wird.

## Abgas

Der Massenstrom des Abgases wurde gemessen und ist bekannt. Die End-Temperatur des Abgases ist nicht genau definiert, denn es handelt sich um einen sogenannten "Soft-Stream", der so weit als möglich gekühlt werden darf, aber nicht muss.

Variante: Beibehalten der TNV

Die Anfangstemperatur bei dieser Variante beträgt gemäss Messung ca. 430°C.

Variante: Ersetzen der TNV durch eine RNV

Da die RNV eine bessere interne Wärmerückgewinnung als die TNV hat, wird die Temperatur des Abgases am Austritt der RNV nur noch ca. 240°C heiss sein. Diese Zahl beruht auf Angaben der Firma Allenspach AG.

## **2.6 Auswertung der Energieströme mit der Pinch-Software**

Die Analyse der oben definierten Energieströme mit der Pinch-Software zeigt in erster Linie das theoretisch mögliche Potenzial der Wärmerückgewinnung auf. In einem weiteren Schritt wird ein Wärmetauscher-Netzwerk erstellt, mit welchem dieses theoretische Potenzial bestmöglich ausgenutzt wird. Beim Erstellen des Netzwerkes wird ersichtlich, welche Energieströme miteinander verbunden werden können, und bei welchen das aufgrund der physikalischen und thermodynamischen Regeln nicht möglich ist.

Bei einem so erstellten Netzwerk gibt es Verbindungen, die zwar theoretisch möglich und aufgrund der erzielbaren Wärmerückgewinnung sinnvoll sind, die aber aus anderen Gründen in der Praxis doch nicht umgesetzt werden. Dies kann z.B. dann der Fall sein, wenn es sich um sehr kleine Wärmetauscher handelt, wo die Kosten für Installation, Regelung und Zuleitung im Verhältnis sehr hoch sein können, oder um Wärmetauscher, die sehr weit entfernte Energiequellen miteinander verbinden, wo also die Leitungskosten und Leitungsverluste verhältnismässig hoch sind.

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Prozesse auf die oben erwähnten Punkte hin betrachtet: Die theoretische Möglichkeit zur Integration des Prozesses und die voraussichtlich praktische Umsetzbarkeit dieser Integration.

### 2.6.1 Integration Bad 1 und Bad 2

Die Pinch-Analyse zeigt, dass die vorhandene Abwärme-Menge des Abgases bei allen Varianten genug hoch ist, um die beiden Bäder damit zu beheizen. Da das Temperaturniveau vergleichsweise tief ist, kann der Wärmetauscher für die Bäder zuhinterst in den Abgas-Strom eingebaut werden, nachdem weiter vorne schon ein Grossteil der vorhandenen Wärme entnommen worden ist.

In der Praxis wird man für die beiden Bäder einen Zwischenkreis mit einem Wasser-Glykol Gemisch einrichten, der auf der einen Seite dem Abgas Wärme entnimmt und auf der anderen Seite diese Wärme an die Bäder weitergibt.

### 2.6.2 Integration Elektro- und Gas-Trocknungsofen

Wenn die Nachverbrennung weiterhin mit der TNV gemacht wird, die Abgastemperatur also hoch bleibt, wäre theoretisch genug Abwärme auf einem genug hohen Temperaturniveau vorhanden, um den Bedarf von Elektro- und Gasofen zu decken. Wenn hingegen neu eine RNV genutzt würde, wäre der Abgasstrom nicht mehr genug energiereich, um den Bedarf der Trocknungsofen zu decken.

In der Praxis wäre der Energiebedarf des Elektroofens (ca. 11 kW) aber tendenziell zu klein, um eine Wärmerückgewinnung zu rechtfertigen. Beim Gasofen wäre eine Wärmerückgewinnung auch in der Praxis denkbar, wurde aber schlussendlich auch nicht zur Umsetzung vorgeschlagen, siehe Kapitel 2.8.

### 2.6.3 Integration Lackierofen

Die Integration des Lackierofens soll primär gewährleistet werden, da es sich dabei um den potentiell grössten Abnehmer von Abwärme handelt. Es zeigt sich, dass die definierten Frischluftströme in jedem Fall bis zur gewünschten Temperatur aufgeheizt werden können. Die in absoluten Zahlen im Lackierofen verwendbare Menge Abwärme ist jedoch von den betrachteten Varianten abhängig.

Wenn der Frischluftkanal nicht ausgewechselt wird, kann zwar die gesamte Wärmemenge bis zur zulässigen Frischlufttemperatur aus dem Abgas gewonnen werden, dies deckt jedoch nicht den gesamten Wärmebedarf des Lackierofens. In diesem Fall müsste noch ca. 40% der Wärmeleistung über die Gasbrenner in den einzelnen Ofenzonen bereitgestellt werden.

Für die Integration des Lackierofens der beste Fall ist das Beibehalten der TNV, was einer hohen Abgastemperatur gleichkommt, mit dem gleichzeitigen Erneuern des Frischluftkanals, der damit auf höhere Temperaturen ausgelegt würde. Dadurch könnten theoretisch über 90% des gesamten Energiebedarfs des Ofens durch Wärmerückgewinnung gedeckt werden. Die Schlitzluft, die direkt in Ofenzone 4 gelangt, kann nicht durch Wärmerückgewinnung geheizt oder kompensiert werden. Diese Luft muss durch den Gasbrenner in der Zone 4 aufgeheizt werden.

In der Praxis wird die Wärmerückgewinnung für den Lackierofen durch einen Luft/Luft Wärmetauscher sichergestellt. Dieser wird nach der Nachverbrennung im Abgasstrom platziert. Die Frischluft wird weiterhin aus der Lackierkabine angesaugt, wird aber neu über diesen Wärmetauscher geführt, bevor sie in den Frischluftkanal oberhalb des Ofens geleitet wird.

### 2.6.4 Integration Kühlung

Mithilfe der Pinch-Analyse konnte geklärt werden, ob und wie die Kühlung des Metallbandes in die Wärmerückgewinnung miteinbezogen werden kann. Es ist schnell ersicht-

lich, dass nicht die gesamte Kühlung, sondern höchstens Teile davon für eine Wärmerückgewinnung genutzt werden könnten. Ein mögliches Wärmetauschernetzwerk, wo die energetisch bestmögliche Integration der Kühlung erreicht werden könnte, ist in Abbildung 7 dargestellt.

Für die Rückkühlung des Kühlwassers von den definierten 70°C auf 20°C wären 3 Wärmetauscher nötig, die allesamt eine eher kleine Leistung hätten. Dies ist ungünstig, da der Aufwand pro Wärmetauscher im Vergleich zu dessen Nutzen dadurch relativ gross wird. Weiter wird aus Abbildung 7 ersichtlich, dass es innerhalb des Prozesses keine genug tiefen Temperaturen gibt, mit denen eine Kühlung bis 20°C möglich wäre. Ein Teil der Kühlung muss also sowieso durch ein Kühlmedium sichergestellt werden. Zudem wird festgestellt, dass dieses Kühlmedium mit dem Einführen von Kühlwasser als Zwischenstufe letztlich kälter als die bisher verwendete Umgebungsluft von ca. 20°C sein muss. Der Grund für dieses Phänomen ist, dass Wärme nur von heissen zu kalten Temperaturen übertragen werden kann, und dass dazu ein gewisses  $\Delta T$  zwischen den Strömen vorhanden sein muss. Wenn dieses  $\Delta T$  z.B. 10°C beträgt, kann mit 20°C warmer Luft das Metall bis 30°C abgekühlt werden (wobei auch diese Auslegung sehr knapp ist), aber mit derselben Luft lässt sich das Kühlwasser nicht bis 20°C abkühlen. Das heisst also, dass für die Umsetzung der dargestellten Variante sogar noch ein zusätzliches, kälteres Kühlmedium bereitgestellt werden müsste.

Aus diesen Gründen wurde beschlossen, dass die Einbindung der Kühlung - auch eine teilweise Einbindung - zu wenig wirtschaftlich wäre und deshalb nicht umgesetzt wird.

## 2.7 Vergleich der Varianten

Beim Kombinieren der verschieden definierten Ströme haben sich drei Varianten herauskristallisiert.

### Minimalvariante mit TNV

- Nachverbrennung weiterhin mit TNV
- Kein Ersatz des Frischluftkanals
- Die Frischlufttemperatur darf in der Folge höchstens 210°C betragen (Begrenzung durch zulässige Temperatur des Materials)

### Maximalvariante mit TNV

- Nachverbrennung weiterhin mit TNV
- Ersatz des Frischluftkanals
- Die Frischlufttemperatur darf in der Folge bis zu 310°C betragen (Begrenzung durch Solltemperatur in der Ofenzone 1)

### Variante RNV

- Zur Nachverbrennung wird neu eine RNV eingesetzt
- Die Frischlufttemperatur darf höchstens 210°C betragen (dies ist einerseits begrenzt durch die maximal zulässige Temperatur im Frischluftkanal, andererseits entspricht dies aber aufgrund der tieferen Abgastemperatur gleichzeitig ca. der maximal möglichen Temperatur, auf die der Strom aufgeheizt werden kann)
- Der Frischluftkanal muss in der Folge nicht ersetzt werden

### 2.7.1 Minimalvariante mit TNV

In Abbildung 2 sind die sogenannten Verbundkurven dieser Variante dargestellt. Für diese Darstellung werden alle kalten Ströme - die aufgeheizt werden müssen - rechnerisch zu einer Kurve zusammengefasst. Diese Kurve ist blau dargestellt. Analog werden alle heißen Ströme - die gekühlt werden müssen - zur roten Kurve zusammengefasst. Überall dort, wo es eine senkrechte Überlappung der heißen und kalten Verbundkurve gibt, kann theoretisch Wärme zurückgewonnen werden. Aus Abbildung 2 wird deutlich, dass es eine sehr grosse Überlappung der Kurven gibt, und sich die definierten Ströme deshalb hervorragend für eine Wärmerückgewinnung eignen.

Aus dem Pinch-Programm ist die theoretisch maximal mögliche Rückgewinnungsleistung auslesbar. Sie beträgt in diesem Fall 643 kW.

Bei dieser Variante muss allerdings bedacht werden, dass aufgrund der maximal zulässigen Temperatur im Frischluftkanal das vorhandene Rückgewinnungspotenzial nicht optimal ausgenutzt werden kann. Dies geht aus der Grafik unten zwar nicht hervor, kann aber beim Vergleich der Minimalvariante mit TNV und der Maximalvariante mit TNV gesehen werden.

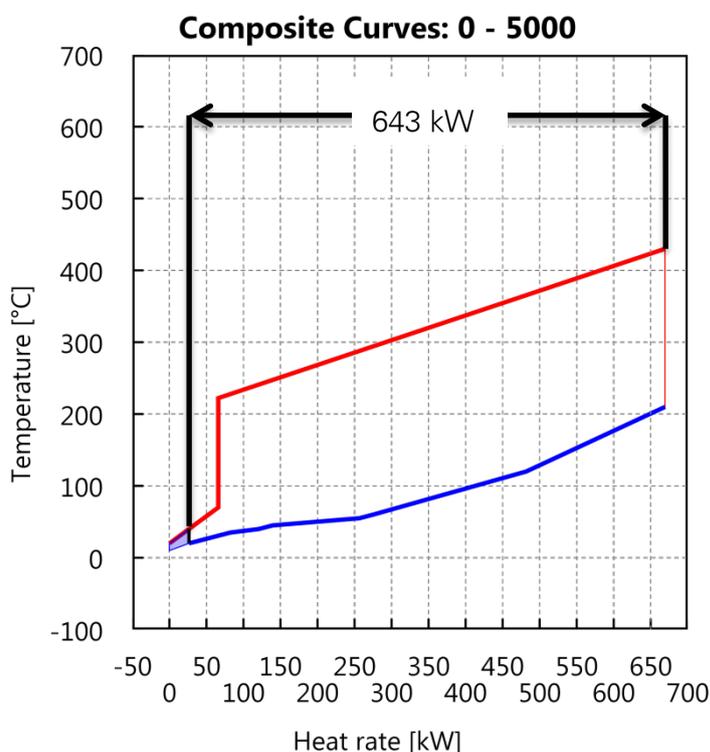


Abbildung 2: Verbundkurven der Minimalvariante mit TNV

In Tabelle 2 sind die Kennzahlen dieser Variante aufgelistet. Zuerst werden die theoretisch möglichen Einsparungen in kWh und CHF aufgelistet und summiert. Diese Zahlen werden dann den geschätzten Investitionen gegenübergestellt.

Bei der Minimalvariante mit TNV ergeben sich folgende Vor- und Nachteile:

- Die nach dieser Variante ausgelegten Wärmetauscher sind zu klein, um das Rückgewinnungspotenzial des Abgases in der jetzigen Situation, mit TNV, vollständig auszunutzen.
- Bei einer späteren Umstellung auf eine RNV würde die Rückgewinnungsleistung

- merklich kleiner werden, da die Abgastemperatur verringert wird.
- Der Frischluftkanal muss nicht umgebaut werden, was die Investitionen verkleinert.
- Der Payback der Minimalvariante liegt unter 2 Jahren.

<b>Einsparung Energieträger</b>			<b>kWh/a</b>	<b>CHF/a</b>	<b>tCO<sub>2</sub>/a</b>
<u>Bad 1</u>					
Leistung	kW	70	350'000	59'500	
<u>Bad 2</u>					
Leistung	kW	15	75'000	12'750	
<u>Elektroofen</u>					
Leistung	kW	11	55'000	9'350	
<u>Gasofen</u>					
Leistung	kW	80	400'000	36'400	93
<u>Zonen 1 - 4</u>					
Leistung	kW	400	2'000'000	182'000	465
<b>Summe</b>			<b>2'880'000</b>	<b>300'000</b>	<b>558</b>
Einsparung Energieträger				300'000 CHF/a	
Rückerstattung CO <sub>2</sub> -Abgabe				64'315 CHF/a	
<b>Total Einsparungen</b>				<b>364'315 CHF/a</b>	
RNV				0 CHF/a	
Umbau Frischluftkanal				0 CHF/a	
WT Frischluft				350'000 CHF/a	
WT Bäder				150'000 CHF/a	
WT Elektroofen				35'000 CHF/a	
WT Gasofen				70'000 CHF/a	
Weiteres, 10%		0.1	61'000 CHF/a		
<b>Total Investitionen</b>				<b>666'000 CHF/a</b>	
<b>Payback</b>				<b>1.8 a</b>	

Tabelle 2: Kennzahlen der Minimalvariante mit TNV

### 2.7.2 Maximalvariante mit TNV

Abbildung 3 stellt die Verbundkurven der Maximalvariante mit TNV dar. Auch hier kann eine grosse Überlappung der Kurven und demzufolge eine sehr gute Eignung für eine Wärmerückgewinnung festgestellt werden. Ebenfalls ersichtlich ist die theoretische Rückgewinnungsleistung von 851 kW.

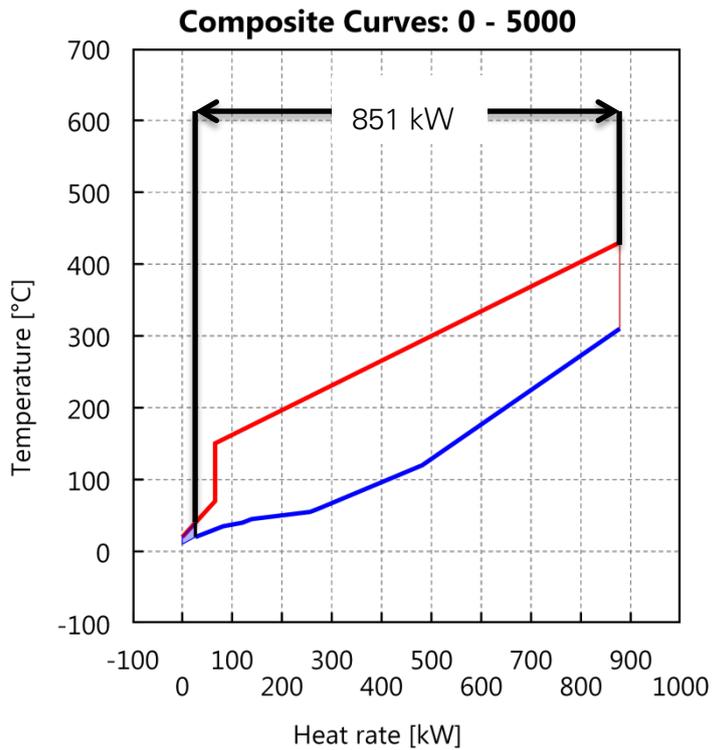


Abbildung 3: Verbundkurven der Maximalvariante mit TNV

Bei der Maximalvariante mit TNV ergeben sich folgende Vor- und Nachteile:

- Die Wärmetauscher sind mit dieser Auslegung gross genug, um eine hohe Ausnutzung des Potenzials im Abgas zu ermöglichen.
- Der nötige Umbau des Frischluftkanals sowie die grössere Wärmetauscherfläche vergrössern die Investitionen.
- Die Einsparungen wachsen jedoch fast im gleichen Mass, sodass sich im Vergleich zur Minimalvariante nur ein leicht höherer Payback ergibt, der immer noch unter 2 Jahren liegt.

Einsparung Energieträger			kWh/a	CHF/a	tCO <sub>2</sub> /a
<u>Bad 1</u>					
Leistung	kW	80	400'000	68'000	
<u>Bad 2</u>					
Leistung	kW	20	100'000	17'000	
<u>Elektroofen</u>					
Leistung	kW	11	55'000	9'350	
<u>Gasofen</u>					
Leistung	kW	135	675'000	61'425	157
<u>Zonen 1 - 4</u>					
Leistung	kW	600	3'000'000	273'000	698
<b>Summe</b>			<b>4'230'000</b>	<b>428'775</b>	<b>855</b>
Einsparung Energieträger				428'775 CHF/a	
Rückerstattung CO <sub>2</sub> -Abgabe				46'526 CHF/a	
<b>Total Einsparungen</b>				<b>475'301 CHF/a</b>	
RNV				0 CHF/a	
Umbau Frischluftkanal				50'000 CHF/a	
WT Frischluft				500'000 CHF/a	
WT Bäder				150'000 CHF/a	
WT Elektroofen				35'000 CHF/a	
WT Gasofen				80'000 CHF/a	
Weiteres, 10%	0.1		82'000 CHF/a		
<b>Total Investitionen</b>				<b>897'000 CHF/a</b>	
<b>Payback</b>				<b>1.9 a</b>	

Tabelle 3: Kennzahlen der Maximalvariante mit TNV

### 2.7.3 Variante RNV

Die Verbundkurven der Variante RNV sind in Abbildung 4 dargestellt. Da das Abgas bei dieser Variante nur noch mit 240°C zur Verfügung steht, ist die Energie nicht mehr ausreichend, um den gesamten Bedarf der definierten Ströme zu decken. Die beiden Trocknungsöfen würden deshalb nicht mehr in die Wärmerückgewinnung eingebunden werden. Die theoretische Rückgewinnungsleistung beträgt 591 kW. Es muss allerdings beachtet werden, dass die Wärmerückgewinnung innerhalb der RNV im Vergleich zur TNV markant verbessert wird. Die zusätzliche Rückgewinnungsleistung innerhalb der RNV würde nochmal über 500 kW betragen. Im Gesamten lässt sich daher mit dieser Variante im Vergleich zur heutigen Situation am meisten Energie und CO<sub>2</sub> einsparen.

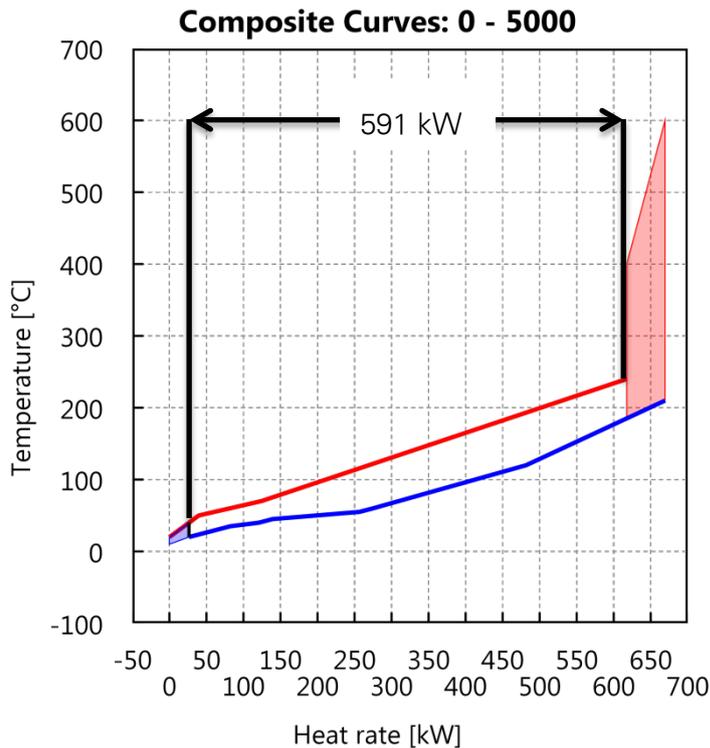


Abbildung 4: Verbundkurven der Variante RNV

Bei der Variante RNV ergeben sich folgende Vor- und Nachteile:

- Von den drei Varianten ergibt die Variante RNV die grössten Energie und CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Mehr als die Hälfte dieser Einsparungen fällt in der RNV selbst an, da die dort integrierte Wärmerückgewinnung im Vergleich zur TNV viel leistungsfähiger ist.
- Die Wärmetauscherfläche der Frischluftherwärmung muss ca. gleich gross sein wie bei der Maximalvariante mit TNV, obwohl die Leistung kleiner ist. Der Grund dafür ist die tiefere Abgastemperatur, die ein kleineres  $\Delta T$  zwischen heissem und kaltem Strom im Wärmetauscher verursacht.
- Wenn die TNV durch eine RNV ersetzt wird, muss die jetzige Anordnung von Luftleitungen, Ventilatoren und Kamin aus Platzgründen leicht geändert werden. Dies erhöht die Installationskosten (im Punkt "Weiteres") berücksichtigt.
- Der Payback dieser Variante liegt bei etwas über 2 Jahren, und ist damit schlechter als bei den ersten beiden Varianten.

Einsparung Energieträger			kWh/a	CHF/a	tCO <sub>2</sub> /a
<u>RNV</u>					
Leistung	kW	540	2'700'000	245'700	628
<u>Bad 1</u>					
Leistung	kW	80	400'000	68'000	
<u>Bad 2</u>					
Leistung	kW	20	100'000	17'000	
<u>Elektroofen</u>					
			0	0	
<u>Gasofen</u>					
			0	0	0
<u>Zonen 1 - 4</u>					
Leistung	kW	400	2'000'000	182'000	465
<b>Summe</b>			<b>5'200'000</b>	<b>512'700</b>	<b>1'093</b>
Einsparung Energieträger				517'250 CHF/a	
Rückerstattung CO <sub>2</sub> -Abgabe				31'528 CHF/a	
<b>Total Einsparungen</b>				<b>548'778 CHF/a</b>	
RNV				450'000 CHF/a	
Umbau Frischluftkanal				0 CHF/a	
WT Frischluft				500'000 CHF/a	
WT Bäder				150'000 CHF/a	
WT Elektroofen				0 CHF/a	
WT Gasofen				0 CHF/a	
Weiteres, 15%	0.15			165'000 CHF/a	
<b>Total Investitionen</b>				<b>1'265'000 CHF/a</b>	
<b>Payback</b>				<b>2.3 a</b>	

Tabelle 4: Kennzahlen der Variante RNV

## 2.8 Empfehlung

Für die Erarbeitung einer Empfehlung wurden von Auftragnehmer und -geber die Vor- und Nachteile der oben beschriebenen Varianten bedacht. Die daraus entstandene Empfehlung kann als eine Kombination der Maximalvariante mit TNV und der Variante RNV, oder als eine schrittweise Umsetzung der Variante RNV angesehen werden.

Die Wärmerückgewinnung soll auf den Betrieb mit RNV ausgelegt werden, die Anlage soll aber bis auf weiteres trotzdem noch mit der TNV betrieben werden. Der Schritt von TNV zu RNV kann auch in ein paar Jahren noch umgesetzt werden. Die Wärmerückge-

winnung wird deshalb für die Bäder und den Lackierofen umgesetzt, nicht aber für die beiden Trocknungsöfen.

Diese Lösung hat den Vorteil, dass damit die langfristig grösstmögliche Einsparung erzielt werden kann, und dass die Investitionskosten auf zwei Projekte (Wärmerückgewinnung, Ersatz TNV) aufgeteilt werden können. Da die Wärmetauscherfläche für die Variante RNV ähnlich hoch ist wie für die Maximalvariante mit TNV, heisst das zudem, dass die Frischluftwärmung beim Betrieb mit TNV fast im vorgesehenen Betriebspunkt der Maximalvariante mit TNV funktionieren wird, obwohl die Auslegung auf den Betrieb mit RNV gemacht ist.

Als Mehrkosten im Vergleich zu einer direkten Umsetzung der Variante RNV fallen nur die Kosten für den Umbau des Frischluftkanals an. Dieser muss, wenn die vorhandene Wärmetauscherfläche beim vorläufigen Betrieb mit TNV möglichst gut ausgenutzt werden soll, mit einem höherwertigen Material erstellt werden, damit die hohen Temperaturen keine Materialschäden verursachen.

Der in Tabelle 4 berechnete Payback der Variante RNV würde eine direkte Umsetzung dieser Variante - was einem vorzeitigen Ersatz der TNV-Anlage entsprechen würde - nicht rechtfertigen. Wenn dieser Ersatz jedoch in einigen Jahren gemacht wird, kann ein Grossteil der Investition der Aufrechterhaltung des Betriebes der Nachverbrennung angerechnet werden. Somit fällt nur noch ein Teil der Investition aus energetischen Gründen an. Wenn dieser Teil z.B.  $\frac{1}{3}$  beträgt, würde sich der Payback der empfohlenen Variante auf 1.8 Jahre senken.

### 3. Massnahmen

Gemäss der Empfehlung von Kapitel 2.8 stehen als umzusetzende Massnahmen in einem ersten Schritt die Erhitzung der Frischluft sowie das Heizen der Bäder 1 und 2 und der Umbau des Frischluftkanals an. Bei diesen Arbeiten wird bereits auf die zukünftigen Platzverhältnisse beim Betrieb der Anlage mit einer RNV Rücksicht genommen. Der Ersatz der TNV durch eine RNV ist als zukünftige Massnahme geplant, und wird deshalb im Folgenden nicht genauer beschrieben.

Ein Prinzipschema der geplanten Massnahmen ist in Abbildung 11 im Anhang abgebildet. Weisskopf Partner GmbH hat für die Planung der Massnahmen ein detailliertes Pflichtenheft erstellt. Das Erstellen des Pflichtenhefts gehört jedoch nicht mehr zur Pinch-Analyse, weshalb in diesem Bericht die Massnahmen nicht in diesem Detaillierungsgrad beschrieben werden.

#### 3.1 Erhitzung der Frischluft

Zur Erhitzung der Frischluft wird ein Luft/Luft Wärmetauscher in den Abgasstrom eingebaut. Dieser wird als erster Wärmetauscher nach der Nachverbrennung platziert. Damit es möglich ist, die Frischluft für spezielle Anwendungen z.B. nur auf 100°C zu erhitzen, ist ein Bypass nötig. Dieser Bypass kann auf der Sekundärseite, also auf der Frischluftseite, installiert werden. Aus Platzgründen ist das in diesem Fall die geeignetere Lösung als ein Bypass auf der Primärseite. Der Bypass ist durch die Solltemperatur der Frischluft nach dem Wärmetauscher geregelt. Bei einer tiefen Solltemperatur wird ein Teil der Frischluft nicht durch den Wärmetauscher geleitet, sondern durch den Bypass. Dadurch erhitzt sich zwar der durch den Wärmetauscher fliessende Teil auf eine noch höhere Temperatur, doch die Mischung der beiden Teile führt bei einem genug hohen Anteil Bypassluft trotzdem zu einer tieferen Temperatur. Dies ist möglich, da die maximal erreichbare Temperatur im Wärmetauscher nach oben begrenzt ist.

Tabelle 5 zeigt die rein rechnerische Auslegung des Luft/Luft Wärmetauschers. Zuerst erfolgt die Auslegung auf den Betriebszustand mit RNV, und anschliessend werden aus der Wärmeübertragungsrate und dem logarithmischen  $\Delta T$  die sich einstellenden Temperaturen beim Betrieb mit TNV errechnet.

Auslegung Luft/Luft WT mit RNV		Betrieb Luft/Luft WT mit TNV		Bypass der heissen Luft, damit Frischlufttemperatur beschränkt bleibt	
Leistung	kW	Cold M*cp	kW/K	Tmax	°C
Hot T_in	°C	Hot T_in	°C	Bypass	%
Hot T_out	°C	Hot T_out	°C	Hot T_out	°C
Cold T_in	°C	Cold T_in	°C	Log $\Delta T$	K
Cold T_out	°C	Cold T_out	°C	Leistung aus $\Delta T$ Cold	kW
Hot M*cp	kW/K	Log $\Delta T$	K	Leistung aus Faktor & $\Delta T$	kW
Log $\Delta T$	K	Leistung	kW		
"Faktor"	kW/K				

Tabelle 5: Auslegungsdaten Erhitzung Frischluft

### 3.2 Heizung Bäder

Zur Heizung der Bäder 1 und 2 wird ein Zwischenkreis installiert. Aus Frostschutzgründen besteht dieser Zwischenkreis aus einem Wasser/Glykol-Gemisch. Das Gemisch wird in einem Luft/Wasser Wärmetauscher durch das Abgas erhitzt. Auch bei diesem Wärmetauscher ist ein Bypass nötig, denn durch die Auslegung auf den Betrieb mit RNV würde beim Betrieb mit TNV zu viel Wärme in den Zwischenkreis fliessen. Der Bypass muss in diesem Fall zwingend auf der Primärseite angelegt werden, da es in einem Bypass auf der Sekundärseite zu Verdampfungsvorgängen kommen könnte. Massgebende Grösse für die Regelung des Bypasses ist die Temperatur des Zwischenkreises nach dem Wärmetauscher. In Tabelle 6 ist die rechnerische Auslegung des Luft/Wasser Wärmetauschers aufgelistet.

Auslegung Luft/Wasser WT mit RNV		Betrieb Luft/Wasser WT mit TNV		Bypass der heissen Luft, damit Frischlufttemperatur beschränkt bleibt	
Leistung	kW	Cold M*cp	kW/K	Tmax	°C
Hot T_in	°C	Hot T_in	°C	Bypass	%
Hot T_out	°C	Hot T_out	°C	Hot T_out	°C
Cold T_in	°C	Cold T_in	°C	Log ΔT	K
Cold T_out	°C	Cold T_out	°C	Leistung aus ΔT Cold	kW
Hot M*cp	kW/K	Log ΔT	K	Leistung aus Faktor & ΔT	kW
Log ΔT	K	Leistung	kW		
"Faktor"	kW/K				

Tabelle 6: Auslegungsdaten Heizung Bäder

Für den Transfer der Wärme vom Zwischenkreis in Bad 1 und Bad 2 gibt es zwei Varianten. Die vorgeschlagene Variante ist im Prinzipschema (Abbildung 11) dargestellt. Dabei wird pro Bad ein Zirkulationskreislauf erstellt, dessen Pumpe gemäss der Badtemperatur im Betrieb ist oder nicht. Im Zwischenkreis gibt es zwei parallel eingebundene Wasser/Wasser Wärmetauscher, die jeweils die Wärme vom Zwischenkreis auf den Zirkulationskreis übertragen. Der Massenstrom in den beiden parallelen Strängen wird durch Ventile gesteuert. Dadurch folgt, dass die Pumpe im Zwischenkreis selber auf einen bestimmten Differenzdruck geregelt werden soll.

Als weitere Variante für den Wärmefluss vom Zwischenkreis zu den Bädern ist auch denkbar, dass auf die Zirkulationskreisläufe pro Bad verzichtet und der Zwischenkreis direkt durch eine Heizschlange im Bad geführt wird.

### 3.3 Einsparungen

Die energetischen und finanziellen Einsparungen, die sich durch die vorgeschlagenen Massnahmen ergeben, sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Einsparungen sind in Relation zu den momentanen Verbräuchen und Kosten sehr hoch. Der Energieverbrauch und der CO<sub>2</sub>-Ausstoss können um mehr als 40% reduziert werden. Dank der Rückerstattung der CO<sub>2</sub>-Abgabe, die ebenfalls durch das Umsetzen dieser Massnahmen ermöglicht wird, beträgt die Kosteneinsparung sogar über 50% im Vergleich zu den momentanen jährlichen Kosten für Strom und Propan.

Durch eine spätere Umrüstung auf eine RNV könnten weitere Einsparungen erzielt werden, sodass die gesamten Einsparungen schlussendlich ca. 65% des heutigen Energieverbrauchs, CO<sub>2</sub>-Ausstosses und der Energiekosten betragen würden.

Einsparung Energieträger			kWh/a	CHF/a	tCO <sub>2</sub> /a
<u>Bad 1</u>					
Leistung	kW	80	400'000	68'000	
<u>Bad 2</u>					
Leistung	kW	20	100'000	17'000	
<u>Lackierofen, Zonen 1 - 4</u>					
Leistung	kW	600	3'000'000	273'000	698
<b>Summe</b>			<b>3'500'000</b>	<b>358'000</b>	<b>698</b>
Einsparung Energieträger				358'000 CHF/a	
Rückerstattung CO <sub>2</sub> -Abgabe				56'000 CHF/a	
<b>Total Einsparungen</b>				<b>414'000 CHF/a</b>	

Tabelle 7: Einsparungen durch die vorgeschlagenen Massnahmen

### 3.4 Wirtschaftlichkeit

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit basiert auf den Rechnerischen Einsparungen und den Investitionskosten. Diese sind durch eine Offerte zur Umsetzung der vorgeschlagenen Massnahmen abgestützt. Bei allen Kosten ist die Mehrwertsteuer von 8% enthalten. Es fallen auf der Seite des Bauherrn einige Arbeiten an, die im Zuge der Umsetzung der Wärmerückgewinnung erbracht werden müssen. Diese sind z.B. das Bereitstellen von Fundamenten, von Zuleitungen, die Anpassung des Leitsystems oder die Aussparungen im Gebäude für die Leitungsführung. Der Aufwand für diese Arbeiten wurde geschätzt und ist als Punkt "Nicht im Angebot enthaltene Kosten" in die Wirtschaftlichkeitsberechnung eingeflossen. Es ergibt sich damit ein Payback von 2 Jahren.

<b>Total Einsparungen</b>	<b>414'000 CHF/a</b>
Wärmerückgewinnung	902'000 CHF/a
Nicht im Angebot enthaltene Kosten	71'000 CHF/a
Unvorhergesehenes, 5%	49'000 CHF/a
Zwischentotal	1'022'000 CHF/a
Förderbeitrag Klimastiftung	200'000 CHF/a
<b>Verbleibende Investitionen</b>	<b>822'000 CHF/a</b>
<b>Payback</b>	<b>1.99 a</b>

Tabelle 8: Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Massnahmen

## **Anhang**

**A.1 Messung Bad 1**

**A.2 Messung Elektroofen**

**A.3 Messung Luftströme**

**A.4 Ströme**

**A.5 Betrachtung Kühlung**

**A.6 Wärmetauschernetzwerk Minimalvariante mit TNV**

**A.7 Wärmetauschernetzwerk Maximalvariante mit TNV**

**A.8 Wärmetauschernetzwerk Variante RNV**

**A.9 Vergleich der Varianten**

**A.10 Prinzipschema**