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)

Prozessoptimierung mit der Pinch-Methode
V-Zug AG

SCHLUSSBERICHT

Ausgearbeitet durch

Thomas Grieder, DM Energieberatung AG

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

Begleitung durch

Florian Brunner, Helbling Beratung + Bauplanung AG

Impressum

Datum: 14. Januar 2011

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

TP Nr. 8100057-02, Projekt Nr. SI/400358, Verfügung Nr. SI/400358-01

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 5
2 Vorgehen 5
3 Prozessbeschreibung 6
3.1 Übersicht 6
3.2 Vorbehandlung 6
3.3 EPS-Prozess 8
3.4 Email-Prozess 10
3.5 Infrastrukturprozesse 11
3.6 Prozessschema 13
4 Energiedaten 14
4.1 Energiemengen 14
4.2 Spezifischer Wärmebedarf 14
5 Modellierung der Energie- und Massenströme 15
5.1 Berechnungstabellen 15
5.2 Energieflussdiagramm 16
6 Pinch-Analyse 17
6.1 Prozessanforderungen 17
6.2 Stromtabelle 17
6.3 Abbildung mit PinCH-Tool 18
7 Massnahmenliste 24
7.1 Massnahmen aus Pinch-Analyse 24
7.2 Wirtschaftlichkeit 25
7.3 Weitere Massnahmen 28
8 Empfehlung 29
9 Literaturverzeichnis 30
10 Anhangsverzeichnis 30

1 Ausgangslage und Ziele

Die V-Zug AG startete im Frühjahr 2009 ein umfassendes Programm zur Steigerung der Energieeffizienz auf dem Stammareal in Zug. Alle Energie relevanten Infrastruktur- und Prozessanlagen wurden aufgenommen und die Verbrauchszahlen der Brennstoffe und der Elektrizität erhoben. Es zeigte sich, dass rund 40% des Brennstoffverbrauches auf die Beschichtungsanlage entfällt.

Im nächsten Schritt wurde mit einer Grobanalyse abgeklärt, ob bei dieser Anlage eine Prozessoptimierung unter Anwendung der Pinch-Methode angebracht ist. Die Analyse ergab ein Einsparpotenzial von rund 20% und es konnten bereits Ideen für die Prozessoptimierung vorgeschlagen werden. Aufgrund dieser Resultate wurde im Juni 2010 eine vollständige Pinch-Analyse gestartet, die vom Bundesamt für Energie im Rahmen der laufenden Arbeiten zur Förderung der Pinch-Analyse in der Schweiz finanziell unterstützt wird.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Resultate der Grobanalyse zu verifizieren und ein Konzept für ein optimales Wärmetauscher-Netzwerk für die Beschichtungsanlage der V-Zug AG zu erarbeiten. Die relevanten Ströme werden bei Bedarf mit Messungen abgesichert. Als Resultat ist ein Massnahmenkatalog zu erstellen, der das Einsparpotenzial, die technische Machbarkeit sowie die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen beschreibt.

2 Vorgehen

Jeder thermisch relevante Anlagenteil ist mit einem separaten Gaszähler ausgestattet. Die Verbrauchszahlen sind bereits aus der Grobanalyse bekannt. Auch die Funktionsweise der einzelnen Schritte sowie die Energie- und Masseströme sind weitgehend bekannt.

Im Rahmen der eigentlichen Pinch-Analyse wurden in einem ersten Schritt die Leistungen der einzelnen Masseströme berechnet respektive verifiziert. Es zeigte sich, dass nur sehr wenige Ströme für die Pinch-Analyse relevant sind. Für die Modellierung lässt sich der Prozess stark vereinfachen.

Im zweiten Schirtt wurden die Prozessanforderungen hinterfragt. Dies geschah in Zusammenarbeit mit den Herstellern der einzelnen Anlagenteile sowie mit dem Anlagenbetreiber V-Zug AG. Hier konnte nur ein sehr geringes Optimierungspotenzial aufgezeigt werden. Veränderungen der Temperaturen und der Masseströme haben sehr schnell Auswirkungen auf die Qualität der Produkte und sind nicht zulässig. Eine bestehende Abwärmenutzung wurde für die Modellierung eliminiert, damit als Resultat der Pinch-Methode ein optimales Wärmetauscher-Netzwerk (MER-HEN) entworfen werden kann.

Im nächsten Schritt wurden die relevanten Energie- und Masseströme mit der neuen PinCH-Software der Hochschule Luzern erfasst. Die weitere Analyse und der Entwurf des theoretisch optimalen Wärmetauscher-Netzwerkes können vollständig mit diesem Tool erfolgen.

Im abschliessenden Schritt wurde die technische Machbarkeit der Massnahmen abgeklärt und die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Massnahmen berechnet.

3 Prozessbeschreibung

3.1 Übersicht

In der Oberflächentechnik der V-ZUG AG werden zwei thermische Beschichtungsverfahren angewendet, eines für organisch zu beschichtende Blechteile (sogenannte EPS-Beschichtung) und eines für zu emaillierende Blechteile. Die Teile werden an zwei getrennten Fördersystemen aufgehängt und durchlaufen kontinuierlich die verschiedenen Prozessschritte.

Die Prozessschritte umfassen: Chemische Vorbehandlung inklusive spülen und trocknen, beschichten und einbrennen. Ein Teil der Bleche wird nass beschichtet und muss vor dem Einbrennen im Schlickertrockner vorgetrocknet werden.

Teile ohne besondere Anforderungen bezüglich Temperaturbeständigkeit werden mit einem organischen Pulverlack beschichtet und bei 200°C eingebrannt. Teile, die später eine hohe Temperaturbeständigkeit aufweisen müssen, z.B. Backofenelemente, werden mit einer Email-Beschichtung versehen und bei 830 bis 850°C eingebrannt.

Die Vorbehandlung inklusive Haftwassertrockner besteht aus zwei parallelen Linien. Nach dem Trockner trennen sich die Linien, die Teile, die organisch beschichtet werden verbleiben auf der gleichen Kette und laufen zur Pulverbeschichtung. Die Teile, die emailliert werden, müssen auf eine hoch hitzebeständige Kette umgehängt werden und durchlaufen anschliessend die Email-Beschichtung.

Die Anlage ist rund 10 Jahre alt.

3.2 Vorbehandlung

Die Vorbehandlung besteht aus den Teilschritten entfetten, spülen und trocknen. Weitere chemische Bäder, wie chromatieren, passivieren etc. sind nicht notwendig.

3.2.1 Bäder

Pro Linie durchlaufen die Teile zwei Entfettungs- und drei Spülbäder. Die Entfettungsbäder sind auf 55°C beheizt. Die zwei ersten Spülbäder arbeiten mit Leitungswasser, das dritte Bad mit vollentsalztem Wasser (VE-Wasser). Alle drei Spülbäder sind unbeheizt.

Es handelt sich bei allen Bädern um Sprühbäder. Die Sprühkränze arbeiten durchgehend während der ganzen Betriebszeit. Auch bei längerem Stillstand der Kette laufen die Pumpen weiter.

Zwischen den Entfettungs- und den Spülbädern gibt es keine Türe. Warme Schwaden aus dem Entfettungsbad können in die Spülbäder verschleppt werden. Allerdings werden am Ende des zweiten Entfettungsbades die Schwaden über eine Abluftanlage abgesaugt (8‘000 m^3/h). Die gleiche Abluftanlage zieht auch Luft im Eintrittsbereich ab.

Durch die warmen Teile und die verschleppte Entfettungslauge erwärmt sich das erste Spülbad auf 40°C, das zweite auf 30°C. Das dritte Spülbad ist kalt. Die Teile verlassen das dritte Spülbad mit einer Temperatur von 18°C.

Die Entfettungsbäder werden mit einem Gaskessel beheizt. Die Vor- und Rücklauftemperaturen betragen 80/60°C.

Verweildauer: Entfettungsbäder je 90 s, Spülbäder 2 x 42 s und letztes Spülen 15 s.

Tankinhalt Entfettungsbäder zweimal 7,5 m^3, Spülbäder dreimal 2,5 m^3.

In das dritte Spülbad werden pro Stunde 200 kg vollentsalztes Wasser nachgespeist.

Abbildung 1 Auf- und Abhängen der Teile für die Pulverbeschichtung in der Halle Nord

Abbildung 2 Einlauf des Entfettungsbades

Die Halle Nord (Gebäude 21), in der die Teile aufgehängt werden, ist kühl, ca. 17°C im Januar.

Abbildung 3 Aufhängen der Teile für Emailbeschichtung und der Teile, die nur die Entfettung durchlaufen

Abbildung 4 Sprühtunnel (rechts), Tank mit Entfettungslauge (unterer Bildrand) und Badheizung

3.2.2 Haftwassertrockner

Im Haftwassertrockner wird bei 160°C das an den Teilen haftende Wasser verdunstet.

Aus der Kammer werden pro Stunde 3‘480 m^3 feuchte Luft mit 160°C über eine Abluftanlage abgeführt. Die enthaltene Wärme wird nicht genutzt.

Der Haftwassertrockner ist direkt mit einem Erdgasbrenner beheizt. Die Verbrennungsgase vermischen sich mit der Umluft der Kammer und werden letztlich mit der Abluftanlage abgeführt.

Die Temperatur der Bleche und Gehänge wurde mit einem Infrarot-Thermometer gemessen. Für die Gehänge wurde eine Temperatur von 100°C angezeigt. Bei den Teilen zeigte das Messgerät nur 32°C, was aber nicht mit dem fühlbaren Eindruck übereinstimmt. Durch die blanke spiegelnde Oberfläche wird die Messung verfälscht. Eine Temperatur von 100°C ist auch für die Bleche plausibler.

Abbildung 5 *Auslauf des dritten Spülbades (rechts) und Einlauf zum Haftwassertrockner (links)*

Abbildung 6 *Auslauf des Haftwassertrockners, die Teile kühlen auf dem Rückweg aus (rechts im Bild)*

3.2.3 Auskühlzone 1

Nach dem Haftwassertrockner kühlen die Bleche in der Halle aus. Am Auslass des Trockners haben die Teile noch eine Temperatur von 100 °C. Das Hallendach über der Auskühlzone ist im Winter 30°C warm.

3.3 EPS-Prozess

3.3.1 Pulverbeschichtung

Teile, deren Beschichtung nicht hitzebeständig sein muss, werden mit organischem Pulverlack beschichtet. Dazu werden die Bleche gegenüber der Spritzpistole elektrostatisch aufgeladen. Dank der Aufladung haftet das aufgesprühte Pulver gut an den Blechen. Das überschüssige Pulver wird mit einer Umluftanlage abgesaugt, filtriert und dem Prozess wieder beigefügt. Diese Luftumwälzung verläuft vollständig innerhalb des Beschichtungsraumes, die Pulverkabine verursacht keinen Austausch mit der Umgebungsluft.

Der Raum für die Pulverbeschichtung ist gegenüber der restlichen Anlage baulich abgetrennt. Es sind drei Beschichtungszellen vorhanden. Der Raum als Ganzes wird mit einer Lüftungsanlage belüftet und bei Bedarf gekühlt.

Bei der Beschichtung sind keine thermischen Prozesse vorhanden. Der Energieverbrauch für die elektrostatische Aufladung ist im Vergleich mit den übrigen Prozessschritten vernachlässigbar.

Im hinteren Teil des Raumes laufen die Teile vom Einbrennofen zurück zum Abhängen. Dadurch wird Wärme in den Raum eingetragen, die im Sommer über die Lüftung und Kühlung abgeführt werden muss.

Abbildung 7 Pulverkabine

3.3.2 EPS-Ofen

Im EPS-Ofen wird die organische Beschichtung eingebrannt, d.h. das Pulver wird aufgeschmolzen und reagiert bei 200°C zu einer beständigen Deckschicht.

Der EPS-Ofen ist in einer Höhe von rund 2 Meter angeordnet und hat keine Türen. Die Ein– und Austrittsöffnungen für die Kette sind horizontal ausgeführt, die Wärme steigt im Innern des Ofens in die Höhe und der Wärmeverlust gegen unten, d.h. gegen die Öffnungen, ist gering.

Der Einbrennofen ist ebenfalls indirekt beheizt. Die Restwärme der Abgase wird nicht genutzt und ins Freie abgeführt. Zudem wird die Kammer mit 1‘380 m^3/h entlüftet. Auch diese Restwärme wird nicht genutzt.

Nach dem EPS-Ofen haben die Teile eine Temperatur von 150°C und kühlen rasch auf rund 110°C aus.

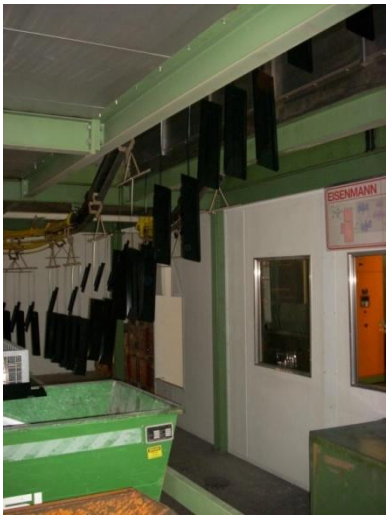


Abbildung 8 Auslauf des Pulvereinbrennofens

3.3.3 Auskühlen

Nach dem Ofen kühlen die Teile beim Weitertransport in der Halle aus. Die Wärme steigt auf bis unter das Hallendach. Es gibt keine spezielle Auskühlzone.

3.4 Email-Prozess

3.4.1 Email-Beschichtung

In einem zweiten abgetrennten Raum findet die trockene Beschichtung mit Emailpulver statt. Auch dieser Raum ist mit einer Lüftungsanlage klimatisiert und kann geheizt und gekühlt werden.

3.4.2 Schlickertrockner

Die Email-Beschichtung kann trocken in Pulverform (elektrostatisch, analog EPS-Beschichten) oder nass als Emulsion aufgebracht werden. Die nass beschichteten Teile müssen vor dem Emaillieren bei 150°C im Schlickertrockner getrocknet werden. Dabei wird das aufgebrachte Wasser vollständig verdunstet. Die Verweildauer beträgt 15 Minuten.

Der Schlickertrockner wird weitgehend mit den Rauchgasen des Email-Ofens beheizt. Die Rauchgase werden während dem Betrieb des Email-Ofens dauernd in den Schlickerofen eingeblasen, der dadurch eine Temperatur von rund 130°C erreicht. Sobald Teile zum Trocknen bereitstehen, wird über den Gasbrenner nachgeheizt und die Temperatur auf 150°C erhöht. Diese Heizung läuft im Durchschnitt 4 Stunden pro Tag.

Um im Ofen einen leichten Unterdruck aufrecht zu erhalten, wird eine Luftmenge entsprechend den eingeblasenen Rauchgasen wieder abgeführt, wobei über einen Wärmetauscher Wärme an die Hallenheizung abgegeben werden kann.

Der Anteil Abwärme aus dem Email-Ofen beträgt rund 190 MWh pro Jahr, die Nachheizung mit Gas benötigt 50 MWh pro Jahr. Dieser Verbrauch wird mit einem Zähler erfasst.

Die Oberfläche des Ofens ist 40°C warm.

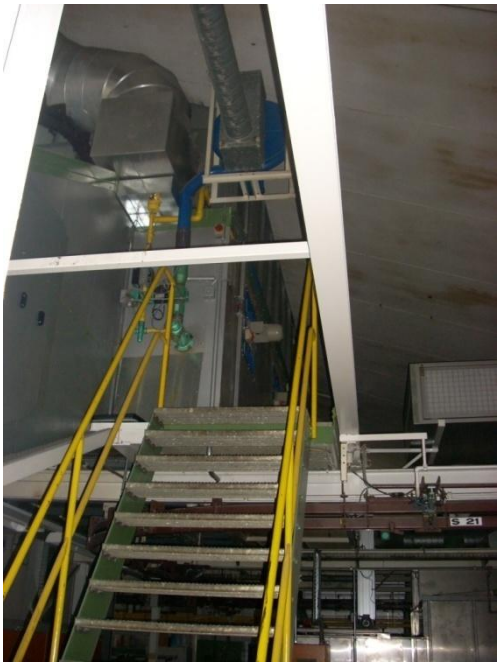


Abbildung 9 Blick zum Schlickertrockner mit Heisslufteinlass vom Email-Ofen

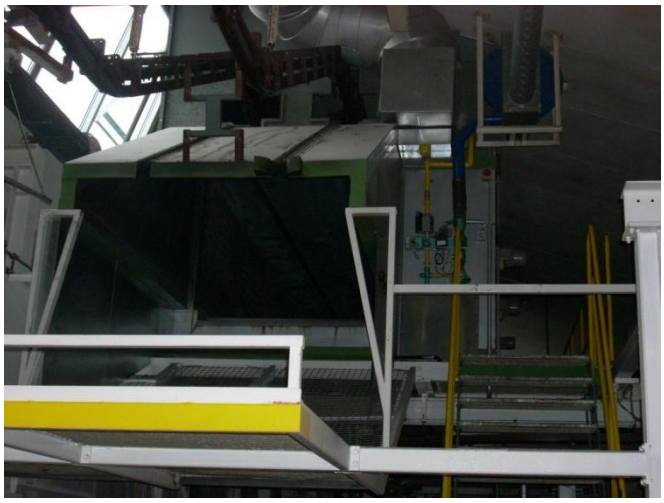


Abbildung 10 Ein- und Auslassöffnung des Schlickertrockners

3.4.3 Email-Ofen

Im Email-Ofen werden diejenigen Teile eingebrannt, die später eine wärmebeständige Beschichtung aufweisen müssen. Das Einbrennen erfolgt bei 830 bis 850°C.

Der Ofen hat eine Einlaufzone von rund 18 Meter Länge, auf der sich die Teile langsam aufwärmen können und gleichzeitig die heissen, eingebrannten Teile ihre Wärme wieder abgeben. Beim Austritt haben die Teile nur noch eine Oberflächentemperatur von 160°C. Die Gehänge wurden mit 320°C gemessen, die Kette mit 220°C.

Die Aufheizung des Email-Ofens beginnt 2,5 Stunden vor Arbeitsbeginn.

Die Oberflächentemperatur des Email-Ofens beträgt im hinteren, heissen Teil 50°C, im vorderen Teil 35°C.

Der Ofen hat je eine Ein- und Austrittsöffnung von 0,8 Meter x 1 Meter. Die austretende Luft hat eine Temperatur von rund 60°C.

Abbildung 11 *Ein- und Austrittsöffnungen des Email-Ofens (kurze Belichtungszeit mit Blitz)*

Abbildung 12 *Ein- und Austrittsöffnungen (lange Belichtungszeit, die Brennkammer am Ende des Ofens wird sichtbar)*

3.4.4 Auskühlen

Nach dem Einbrennprozess kühlen die Teile in der langen Einlaufzone des Ofens bereits stark ab. Die restliche Wärme wird nach dem Austritt an die Hallenluft abgegeben.

3.5 Infrastrukturprozesse

3.5.1 Lüftung

Die beiden Räume für die EPS- und die Email-Beschichtung verfügen über je eine Klimaanlage, mit der die Räume bei Bedarf geheizt und gekühlt werden können.

- EPS-Beschichtung: 15‘000 m^3/h, Kühlung mit Kaltwasser 12/18°C
- Email-Beschichtung: 13‘000 m^3/h, Kühlung mit Kompressions-Kältemaschine, Nachheizen mit Heisswasser 80/60°C.

Abbildung 13 Austrittsöffnung der Lüftungsanlage in der Pulverbeschichtung

3.5.2 Heizung

In unmittelbarer Nähe zu den Entfettungsbädern steht der Gaskessel zur Beheizung der Bäder. Leistung 640 kW, der Gasverbrauch wird mit einem Zähler erfasst und beträgt 380 MWh pro Jahr.

Der Kessel arbeitet mit einer festen Vorlauftemperatur von 80°C, Rücklauf 65°C.

Die Kessel für die Gebäudeheizung sind im Gebäude 13 in rund 100 Meter Entfernung angeordnet. Die Leistung beträgt 2,3 MW, der Jahresverbrauch liegt bei rund 4‘300 MWh.

.

Abbildung 14 Gaskessel für die Entfettungsbäder

3.5.3 Wasseraufbereitung

In der Wasseraufbereitung wird über einen Ionentauscher und eine Umkehrosmose VE-Wasser aus Leitungswasser gewonnen. Es werden pro Stunde 800 Liter vollentsalztes Wasser an das dritte Spülbad abgegeben. Die Wasseraufbereitung beinhaltet keine thermischen Prozesse.

3.6 Prozessschema

In Abbildung 15 sind alle für die Analyse massgebenden Massenströme der Teilprozesse dargestellt. Abbildung 16 zeigt grob die topologische Aufstellung der verschiedenen Anlagenteile in der Halle.

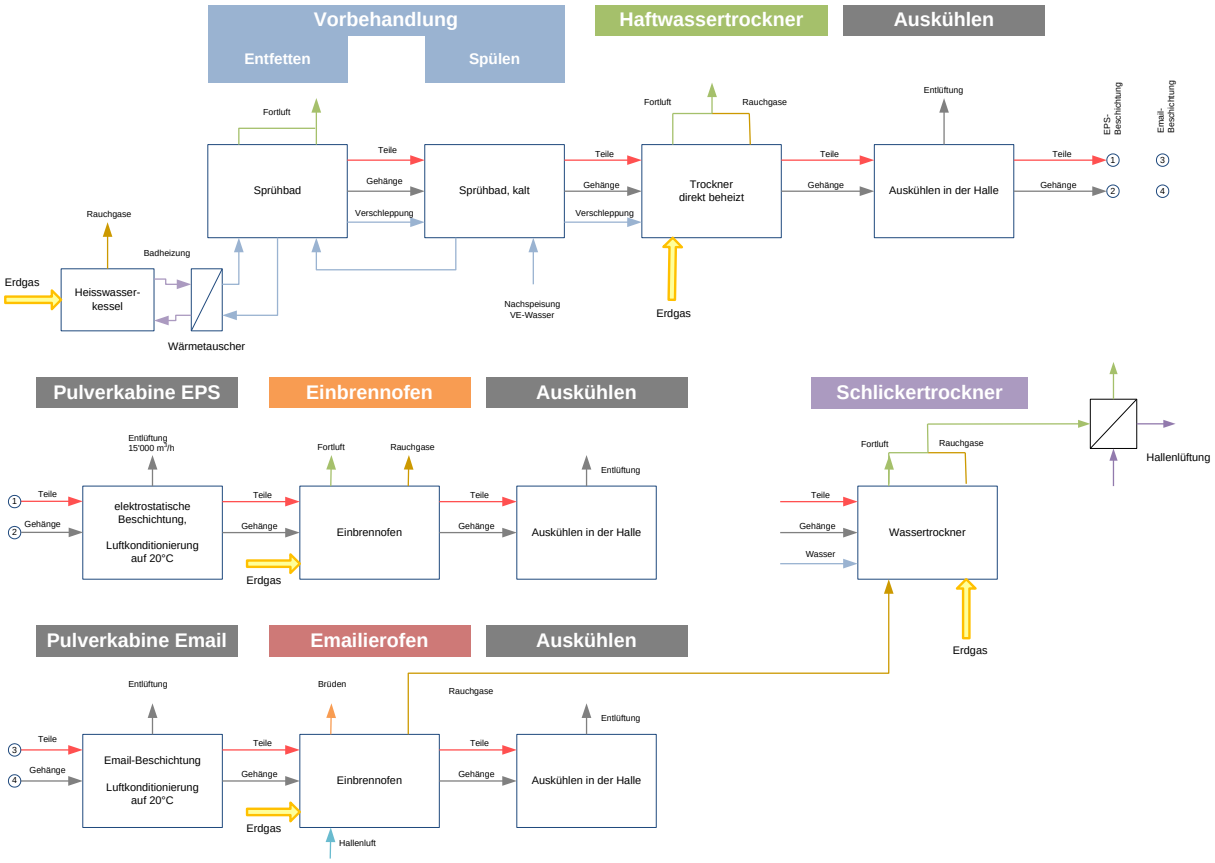


Abbildung 15 Prozessschema der Anlage (siehe auch Anhang 1)

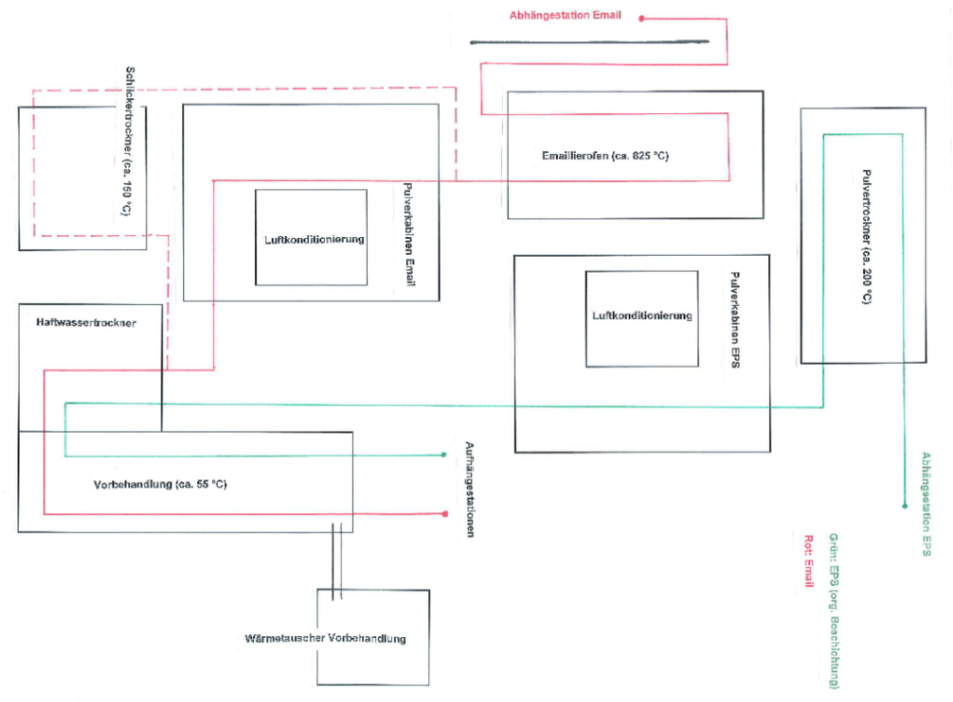


Abbildung 16 topologisches Anlagenschema (nicht massstäblich)

4 Energiedaten

4.1 Energiemengen

Für jeden thermisch relevanten Prozessschritt werden die Gasmengen mit separaten Zählern erfasst. Daher können die Energiemengen für die Prozessschritte genau bestimmt werden. Im Kalenderjahr 2009 wurden die folgenden Mengen erfasst:

- Vorbehandlung 380 MWh
- Haftwassertrockner 610 MWh
- Schlickertrockner 50 MWh
- EPS-Ofen 410 MWh
- Email-Ofen 1‘370 MWh
- Total 2‘820 MWh

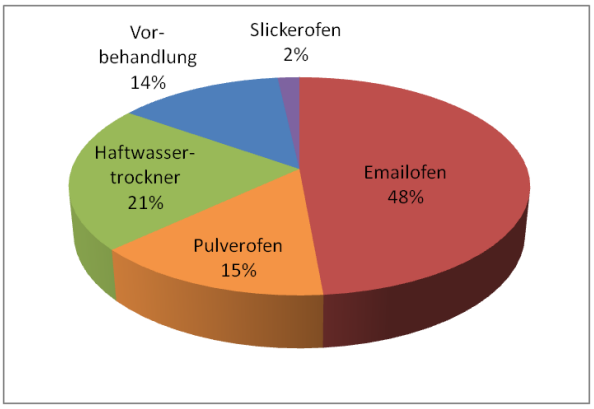


Abbildung 17 Verbrauchsanteile der verschiedenen Anlagen

Der Jahresverlauf ist ausgeglichen und folgt der Auslastung der Anlage.

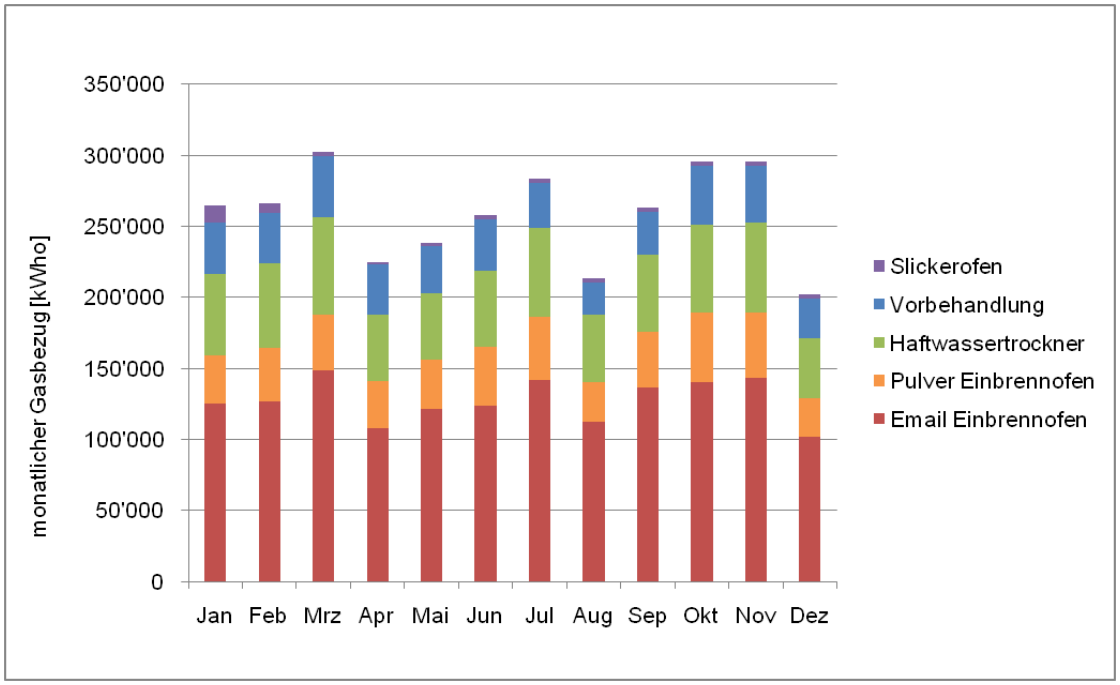


Abbildung 18 Jahresverlauf des Erdgasverbrauchs

4.2 Spezifischer Wärmebedarf

4.2.1 Anlage V-Zug

Anhand des Durchsatzes kann der Wärmebedarf der Vorbehandlung anteilsmässig auf die EPS- und die Email-Beschichtung aufgeteilt werden. Es ergeben sich die folgenden spezifischen Verbrauchswerte:

- EPS-Beschichtung 0,9 kWh/kg
- Email-Beschichtung 2,9 kWh/kg

4.2.2 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 m^2
- Kettenförderer mit 2 m/min, Laufzeit 2‘000 h/a
- Durchsatz 3‘000 Tonnen pro Jahr, 300‘000 m^2 pro Jahr, entspricht 150 m^2/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

4.2.3 Beispiel 2 aus Gloor (1996)

- Anlagen-Kapazität 120 m^2/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

4.2.4 Richtwerte des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2006)

- Vorbehandlung (inkl. Haftwassertrockner) 1,7 kWh/m^2
- Einbrennofen 1,6 kWh/m^2

Spezifischer Verbrauch total:

- flächenspezifischer Verbrauch 3,3 kWh/m^2

4.2.5 Ramseier Rubigen (Grieder 2010)

Batch-Anlage zur Beschichtung von Fensterrahmen und anderen Metallteilen:

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

5 Modellierung der Energie- und Masseströme

5.1 Berechnungstabellen

Basierend auf dem Prozesschema wurden die dazugehörigen Energieströme im Detail berechnet. Die Resultate der Berechnung sind im Anhang 3 dokumentiert.

Die meisten Energieströme ergeben sich aus einfachen physikalischen Überlegungen. Meistens wird Wasser, Metall oder Luft aufgeheizt resp. abgekühlt. Die Leistungen und Energiemengen ergeben sich aus der spezifischen Wärmekapazität der Medien und den Masseflüssen. Als Kontrolle dient der Gasverbrauch, der für jeden Prozessschritt einzeln gemessen wird.

Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass bei allen Prozessschritten die warmen und/oder feuchten Abluftströme die grössten Energieflüsse darstellen. Das Aufwärmen der Teile und Gehänge benötigt im Vergleich dazu wenig Energie. Ein beträchtlicher Anteil wird für das Aufheizen des Kettenförderes

benötigt, der im Vergleich mit den Teilen und Gehängen ein grosses Gewicht hat. Auch die Energieverluste durch die Ein- und Auslassöffnungen sind, mit Ausnahme des Haftwassertrockners, gering, da die zwei Einbrennöfen sowie der Schlickertrockner horizontale Öffnungen haben.

Beim Email-Ofen zeigt sich die Wirkung der langen Ein- und Auslaufstrecken. In diesem Bereich können Teile, Gehänge und die Kette von der heissen, auslaufenden Strecke Wärme an die einlaufende kalte Strecke abgeben. In der Energiebilanz verbleibt ein Energiebedarf, der in etwa dem Aufheizen von Hallentemperatur auf 200°C entspricht.

5.2 Energieflussdiagramm

Mit den Resultaten der obigen Berechnungen konnte ein Sankey-Diagramm der Energieflüsse erstellt werden (vgl. Abbildung 19 und Anhang 4). Für jeden Prozessschritt sind die folgenden Flüsse dargestellt:

- Erdgasverbrauch für die Heizung (gelb)
- Abgasverluste bei den indirekt beheizten Anlagen (orange)
- Abwärme, die in Form von trockener oder feuchter Abluft mit Abluftanlagen über Dach abgeführt wird (violett)
- Abwärme, die unkontrolliert an die Hallenluft abgegeben wird (grau-blau). Darin enthalten ist auch die über die Hüllfläche der Anlagenteile abgegebene Wärme (Transmission) sowie die von den erhitzten Teilen, den Gehängen und dem Kettenförderer abgegebene Wärme.

Eine zweifache Abwärmenutzung besteht heute darin, dass die Rauchgase des Emailofens direkt in den Schlicker eingeblasen werden und diesen auf eine Temperatur von rund 130°C vorwärmen. Die Abluft des Schlickertrockners gibt dann in einem zweiten Schritt die Restwärme an die Lüftungsanlage der Produktionshalle ab. Die Hallenlüftung läuft allerdings stark reduziert, da die abgestrahlte Wärme der Öfen bereits viel Wärme einbringt.

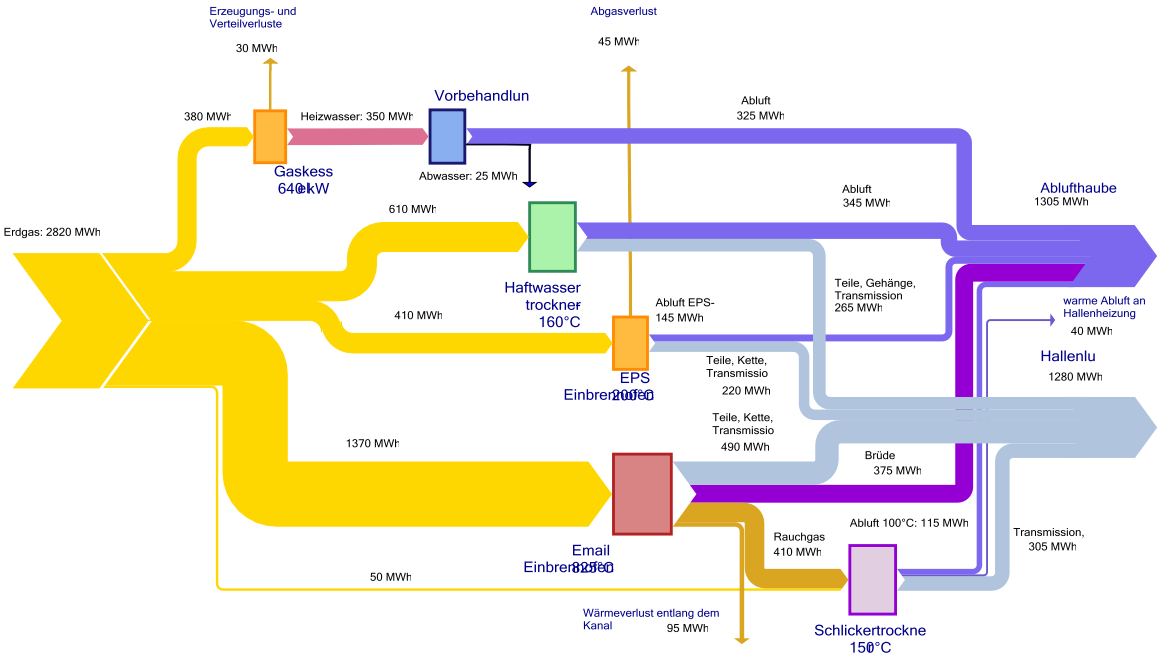


Abbildung 19 Energieflussdiagramm der thermischen Prozesse

6 Pinch-Analyse

Mit den Berechnungstabellen für jeden Prozessschritt kann die eigentliche Pinch-Analyse durchgeführt werden. Die Analyse erfolgt in mehreren Schritten:

- Prozessanforderungen hinterfragen
- Stromtabelle erstellen
- Eingabe ins PinCH-Tool
- Bestimmung der minimalen Temperaturdifferenz für die Auslegung der Wärmetauscher
- Entwurf eines Wärmetauscher-Netzwerks für den minimalen Energiebedarf

Die einzelnen Schritte sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.

6.1 Prozessanforderungen

In Zusammenarbeit mit dem Anlagenbetreiber und den Anlagenherstellern wurden die Prozessanforderungen hinterfragt.

Aus Sicht des Anlagenbetreibers hat die Qualität des Prozesses absoluten Vorrang. Die Anlagen sind heute so eingestellt, dass eine einwandfreie Beschichtung der Teile gewährleistet ist. Eingriffe in den Prozess sind riskant, speziell die Email-Beschichtung ist ein Prozess, der schwierig zu beherrschen ist. Hier sind keinerlei Veränderungen an den Prozessparametern möglich.

Gemäss Anlagenhersteller könnte bei der Vorbehandlung der Abluftstrom um 20% reduziert werden, was aber der Luftqualität in der Halle abträglich sein könnte. Für die Pinch-Analyse wurde mit dem heutigen Volumenstrom gerechnet.

Als weiteres Optimierungspotenzial sieht der Anlagenhersteller die Verluste, die beim Haftwassertrockner durch die Ein- und Austrittsöffnungen entstehen. Um diese zu vermindern wäre der Bau einer Schleuse erforderlich. Diese Massnahme wird in den Massnahmenkatalog am Ende des Berichts aufgenommen. Sie ergibt sich nicht direkt aus der Pinch-Analyse, die Auswirkung auf die Stromtabelle liegt einzig darin, dass der Leistungsbedarf zum Aufheizen des Trockners vermindert würde. Für die vorliegende Arbeit wurde die Massnahme nicht berücksichtigt und die heutige Heizleistung beibehalten.

Ein gewisses Einsparpotenzial wurde bei der Vorwärmung der Verbrennungsluft vermutet. Gerade beim Email-Ofen mit seiner hohen Heizleistung wäre eine beträchtliche Einsparung zu erzielen. Eine Abklärung mit dem Anlagenhersteller zeigt aber, dass bereits im Ofeninnern eine Vorwärmung stattfindet. Eine zusätzliche Vorwärmung der Brennerluft würde zu einer unzulässigen Erhöhung der Stickoxide führen.

Beim Schlickertrockner und beim EPS-Ofen ziehen die Brenner heute Aussenluft an. Die Luftzufuhr und die Rauchrohre, resp. das Abluftrohr beim Schlickertrockner liegen direkt nebeneinander. Daher wurde bei diesen zwei Öfen der Verbrennungsluftstrom in die Pinch-Analyse aufgenommen. Gemäss Aussagen des Brennerlieferanten ist eine Vorwärmung auf 55°C technisch möglich.

6.2 Stromtabelle

Mit den Resultaten des obigen Schrittes kann die Stromtabelle erstellt werden. Dabei werden nur Ströme berücksichtigt, die für eine Abwärmenutzung in Frage kommen.

Bereits bei der Pinch-Analyse Ramseier (Grieder 2010) hat sich gezeigt, dass die Abwärme der Teile, Gehänge und Kette kaum genutzt werden kann. Es wären grosse Schleusenkammern nach jedem Prozessschritt notwendig. Diese abzukühlenden Ströme werden in der Pinch-Analyse nicht berücksichtig. Dasselbe gilt für den Wärmverlust durch die Ein- und Auslassöffnungen.

Für die Pinch-Analyse verbleiben im Wesentlichen die Abluftströme sowie die für jeden Prozessschritt benötigte Heizleistung. Dabei wird die Gasheizung durch Ersatzströme abgebildet. Bei der Vorbe-

handlung durch einen Wasserkreis für die Badheizung, bei den Öfen jeweils durch einen Warmluftstrom. Zusätzlich werden bei den indirekt beheizten Öfen die Rauchgase berücksichtigt, sowie die Verbrennungsluft beim EPS-Ofen und beim Schlickertrockner.

Name	Hot/Cold	Tin	Tout	Flow	Cp	Phase Change	Alpha	Pressure	Fluid	Humidity Ratio	Soft	TStart	TStop
Entfetten Badheizung	Cold	55	60	1.86	16.840	0	1000	1	Simple	0.0050	no	0	0
Entfetten Kammerabluft	Hot	50	20	2.464	0.991	0	50	1	HumidAir	0.0135	no	0	0
Trockner Kammerheizung	Cold	155	160	49.1	1.100	0	50	1	Simple	0.0050	no	0	0
Trockner Kammerabluft	Hot	160	20	0.77	1.303	0	-	1	HumidAir	0.0267	no	0	0
EPS-Ofen Verbrennungsluft	Cold	9	55	0.2025	1.004	0	100	1	HumidAir	0.0000	no	0	0
EPS-Ofen Kammerheizung	Cold	195	200	34.6	1.000	0	50	1	Simple	0.0050	no	0	0
EPS-Ofen Rauchgase	Hot	260	20	0.0771	1.104	0	50	1	Simple	0.0000	no	0	0
EPS-Ofen Kammerabluft	Hot	200	20	0.3854	1.004	0	50	1	HumidAir	0.0000	no	0	0
Email-Ofen Kammerheizung	Cold	825	830	95.3	1.000	0	50	1	Simple	0.0050	no	0	0
Email-Ofen Rauchgase	Hot	380	20	0.399	1.104	0	50	1	Simple	0.0000	no	0	0
Email-Ofen Brüden	Hot	95	20	0.936	1.004	0	50	1	HumidAir	0.0000	no	0	0
Schlickertrockner Verbrennungsluft	Cold	9	55	0.06	1.004	0	100	1	HumidAir	0.0000	no	0	0
Schlickertrockner Kammerheizung	Cold	145	150	31.4	1.000	0	50	1	Simple	0.0050	no	0	0
Schlickertrockner Kammerabluft	Hot	150	20	0.229	1.101	0	-	1	HumidAir	0.0182	no	0	0

Tabelle 1 Prozessströme für die Pinch-Analyse (siehe auch Anhang 5)

Das Prozessschema reduziert sich auf die nachfolgende vereinfachte Darstellung.

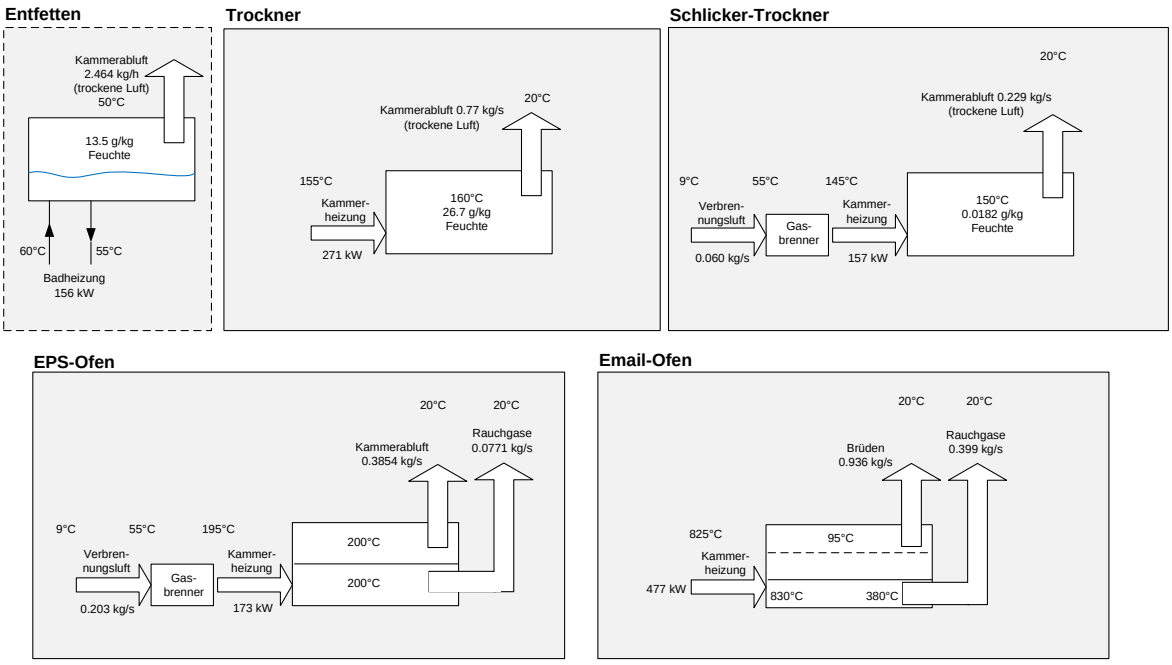


Abbildung 20 vereinfachtes Prozessschema mit den, für die Pinch-Analyse relevanten Strömen (siehe auch Anhang 2)

6.3 Abbildung mit PinCH-Tool

Die Stromtabelle gemäss Tabelle 1 wurde in das PinCH-Tool (Olsen, Wellig 2010) der Hochschule Luzern übertragen. Als Utility-Ströme werden eine Hot Utility mit 900°C bei Kosten von 80 CHF pro Megawattstunde und eine Cold Utility in Form einer Kühlung mit Aussenluft bei Kosten von 5 CHF pro Megawattstunde definiert.

Die Betriebszeit wurde bei allen Anlagenteilen mit 2‘250 Stunden eingetragen. In Realität läuft der Schlickertrockner nur rund 1‘000 Stunden pro Jahr, während der Email-Ofen für das Aufheizen pro

Tag 2,5 Stunden länger läuft, als die übrigen Anlagenteile. Das PinCH-Tool kann diese Situation durch sogenannte „Operating Cases“ abbilden. Im vorliegenden Fall wurde auf eine derart komplexe Modellierung verzichtet. Die Modellierung mit einer gemeinsamen Betriebszeit führt zu einem einfachen Wärmetauscher-Netzwerk, bei dem die Leistungen korrekt berechnet werden. Die unterschiedliche Laufzeit kann bei der Platzierung der Wärmetauscher berücksichtigt werden, indem Strömen mit einer langen Laufzeit der Vorrang gegeben wird. Bei der abschliessenden Berechnung des Einsparpotenzials müssen die unterschiedlichen Laufzeiten dann berücksichtigt werden.

Es resultiert eine Composite Curve gemäss Abbildung 21. Die Pinch-Temperatur liegt bei 97°C und es ergibt sich eine minimale Temperaturdifferenz für die Wärmetauscher von 85°C. Das theoretische Einsparpotential, d.h. der Überlappungsbereich der Kurven, beträgt 169 kW.

Das grosse dTmin hat zwei Gründe:

- Die kurze Anlagenlaufzeit von 2‘250 Stunden ergibt bei einer bestimmten Wärmetauscher-Leistung nur eine geringe Energieeinsparung. Hohe Investitionskosten der Wärmetauscher können schlecht amortisiert werden. Ein grosses dTmin ergibt kostengünstige Wärmetauscher zu Lasten der Energieeinsparung.
- Alle Abwärmeströme liegen in Form von warmen Luftströmen vor. Der Wärmeübertragungswert ist gering, was wiederum grosse Wärmetauscher oder grosse Temperaturdiffernzen erfordert.

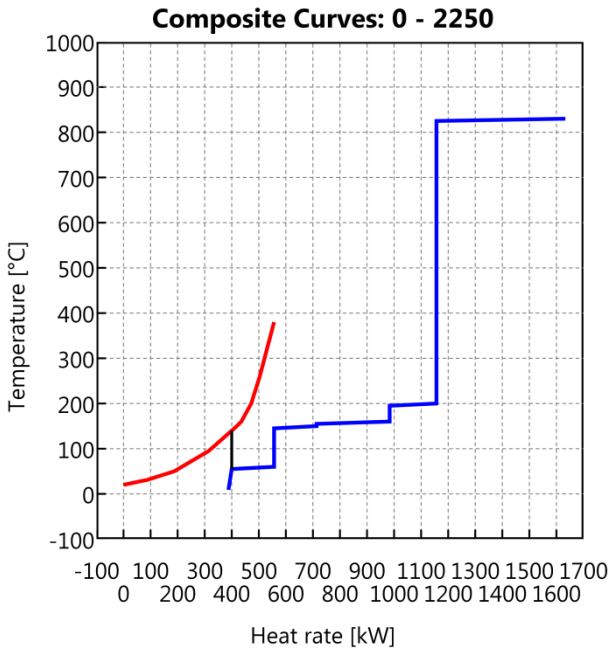


Abbildung 21 Composite Curve, dTmin 85°C

Die Kostenkurve ist aus Abbildung 22 ersichtlich. Sie verläuft im optimalen Bereich sehr flach, das dTmin kann ohne grosse Auswirkung auf die Jahreskosten zwischen 60 und 120°C gewählt werden.

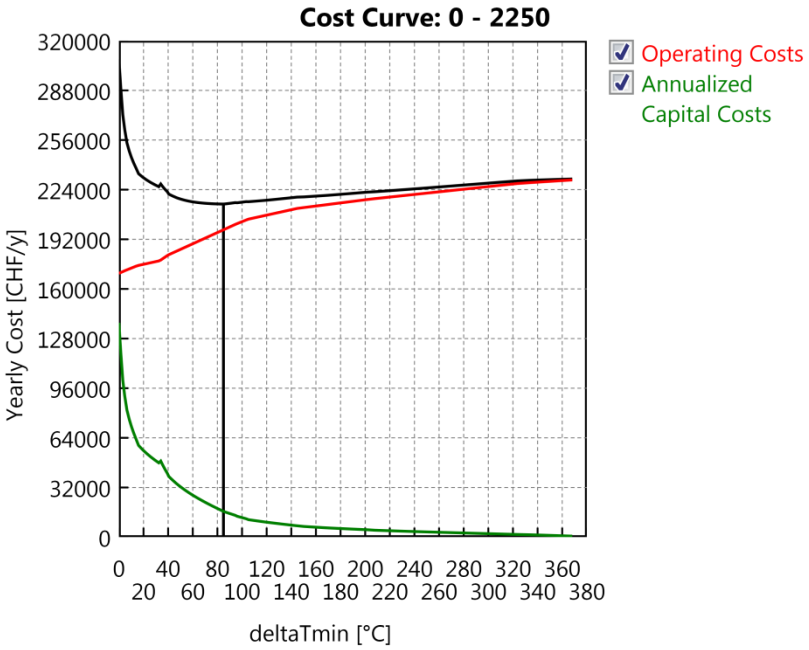


Abbildung 22 Cost Curve, dTmin 85°C

Abbildung 23 zeigt die Prozessströme in der Wärmetauscher-Darstellung (Heat Exchanger Network, HEN). Der grösste abzukühlende Strom sind die Rauchgase des Email-Ofens. Es zeigt sich, dass die bisherige Nutzung zum Heizen des Schlickerofens in Bezug auf die Prozessleistungen eine gute Lösung darstellt. Der Schlickerofen hat aber eine viel kürzere Betriebsdauer, als die übrigen Anlagenteile, was im PinCH-Tool nicht abgebildet wurde.

Als Alternativen kommen die Beheizung des Haftwassertrockners und des Entfettungsbades in Frage. Für das Entfettungsbad stehen weitere Abwärmeströme auf einem tieferen Niveau zur Verfügung, daher stellt die in Abbildung 23 dargestellte Nutzung für den Haftwassertrockner die beste Lösung dar.

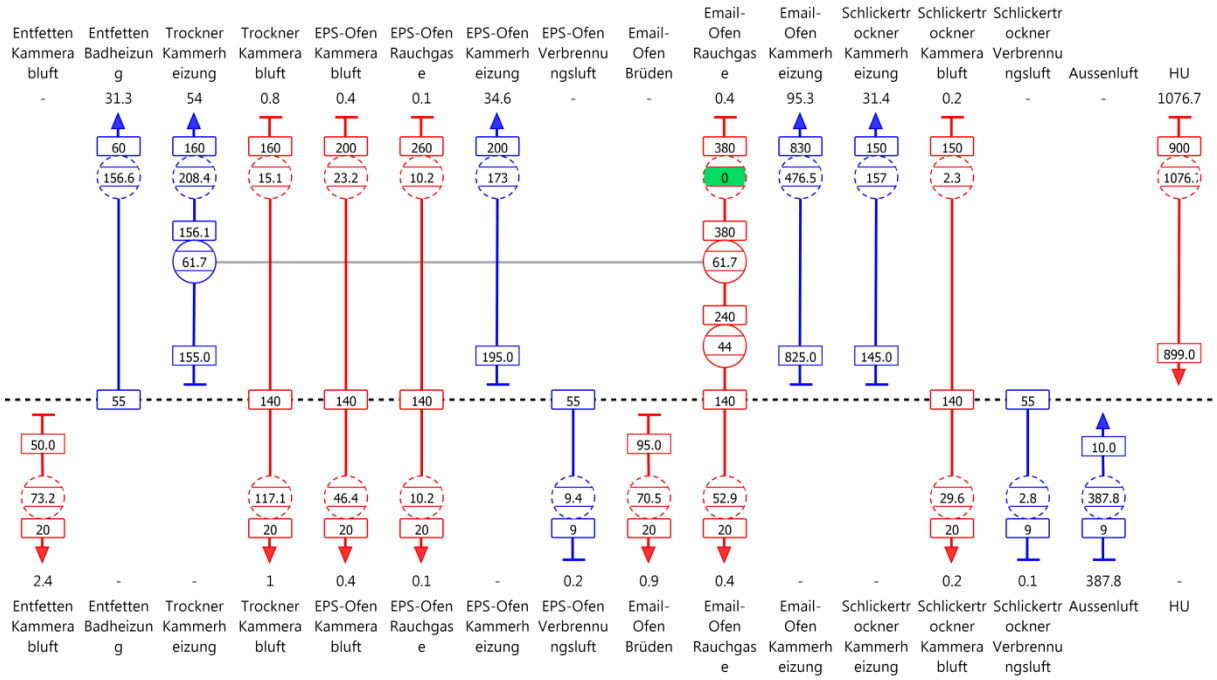


Abbildung 23 Heat Exchanger Network, dTmin 85°C

Die Rauchgase des Email-Ofens werden heute direkt als Massestrom, also nicht über einen Wärmetauscher, in den Schlickertrockner eingeführt. Gemässe Anlagenbetreiber sollte das auch beim Haftwassertrockner möglich sein. Daher muss das dTmin von 85°C nicht eingehalten werden. Die Wärme der Abgase kann bis auf die Kammertemperatur des Trockners von 160°C ausgenützt werden und es ergibt sich eine Leistung des Stromes von rund 100 Kilowatt.

Durch die Umleitung dieses Massestromes ergibt sich auch eine neue Stromtabelle. Unterhalb von 160°C sind die Rauchgase des Email-Ofens mit der Kammerabluft des Haftwassertrockners im gleichen Abluftrohr und erhöhen dort den Massestrom. Um diese neue Situation abzubilden, wurde im PinCH-Tool eine zweite sogenannte „Target Group“ definiert. Gegenüber der ersten Target Group wurden die folgenden Anpassungen vorgenommen:

- Massestrom Kammerabluft Haftwassertrockner um den Massestrom der Rauchgase Email-Ofen erhöht.
- Leistung der Kammerheizung Haftwassertrockner um die mit den Rauchgasen zugeführte Leistung vermindert.
- Heizung Email-Ofen nicht mehr berücksichtigt. Es gibt kein Abwärmepotenzial auf diesem Niveau, die hohe Temperatur der Heizung führt dazu, dass in der Composite Curve der interessante Bereich um den Pinch-Punkt komprimiert wird.

Die neue Stromtabelle ist in Tabelle 2 dargestellt, die Composite Curve in Abbildung 24 und die Kostenkurve in Abbildung 25.

Gemäss Kostenkurve liegt das optimale dTmin bei 40°C. Die Kostenkurve verläuft im optimalen Bereich ebenfalls sehr flach und hat bei 25°C ein relatives Minimum. In Anbetracht zunehmender Energiekosten und tendenziell zunehmender Anlagenlaufzeiten wurde das dTmin mit 25°C festgelegt. Es ergibt sich eine Pinch-Temperatur von 157°C und ein Potenzial für Energierückgewinnung von weiteren 188 Kilowatt.

Name	Hot/Cold	Tin	Tout	Flow	Cp	Phase Change	Alpha	Pressure	Fluid	Humidity Ratio	Soft	TStart	TStop
Entfetten Badheizung	Cold	55	60	1.860	16.840	0	1000	1	Simple	0.005	no	0	0
Entfetten Kammerabluft	Hot	50	20	2.464	0.991	0	50	1	HumidAir	0.0135	no	0	0
EPS-Ofen Kammerheizung	Cold	195	200	34.600	1.000	0	50	1	Simple	0.005	no	0	0
EPS-Ofen Rauchgase	Hot	260	20	0.077	1.104	0	50	1	Simple	0	no	0	0
EPS-Ofen Kammerabluft	Hot	200	20	0.385	1.004	0	50	1	HumidAir	0	no	0	0
Email-Ofen Brüden	Hot	95	20	0.936	1.004	0	50	1	HumidAir	0	no	0	0
Schlickertrockner Kammerheizung	Cold	145	150	31.400	1.000	0	50	1	Simple	0.005	no	0	0
Schlickertrockner Kammerabluft	Hot	150	20	0.229	1.101	0	-	1	HumidAir	0.0182	no	0	0
EPS-Ofen Verbrennungsluft	Cold	9	55	0.203	1.004	0	100	1	HumidAir	0	no	0	0
Schlickertrockner Verbrennungsluft	Cold	9	55	0.060	1.004	0	100	1	HumidAir	0	no	0	0
Trockner Kammerheizung mit AWN	Cold	155	160	31.460	1.100	0	100	1	Simple	0.005	no	0	0
Trockner Kammerabluft mit AWN	Hot	160	20	1.169	1.303	0	-	1	HumidAir	0.0267	no	0	0

Tabelle 2 Prozessströme nach Umleitung der Rauchgase aus dem Email-Ofen (siehe auch Anhang 5)

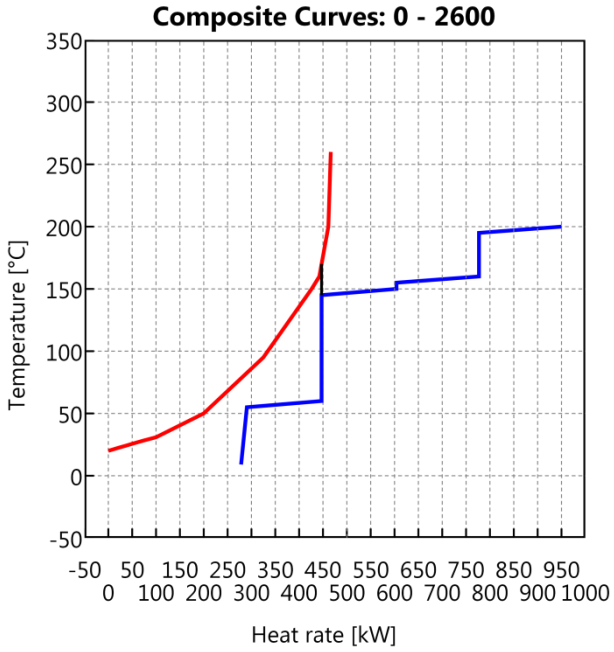


Abbildung 24 Composite Curve nach Umleitung der Rauchgase des Email-Ofens

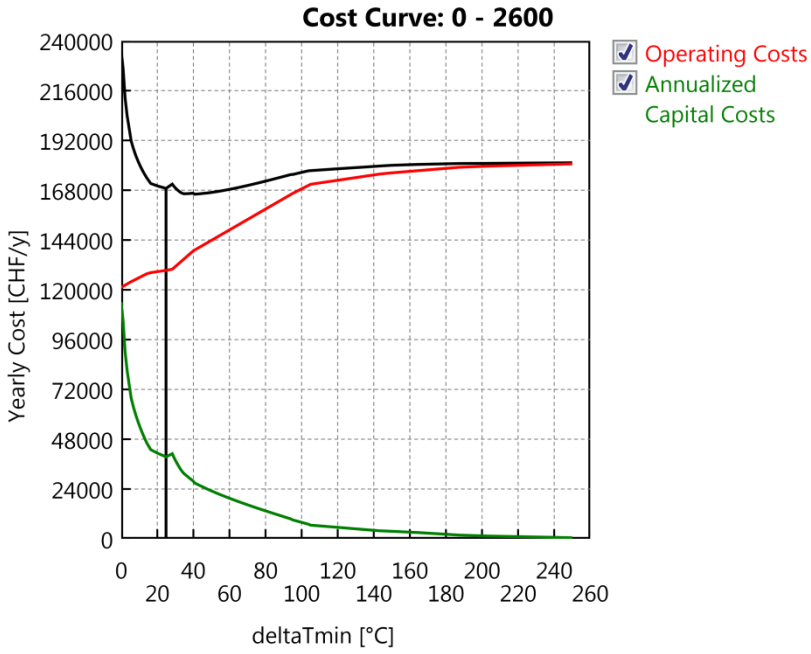


Abbildung 25 Cost Curve nach Umleitung der Rauchgase des Email-Ofens

Abbildung 26 zeigt die Prozessströme in der Wärmetauscher-Darstellung. Oberhalb des Pinch-Punktes verbleiben im Wesentlichen nur noch die Heizungen von Haftwassertrockner, Schlickertrockner und EPS-Ofen. Die Leistung der abzukühlenden Ströme ist sehr gering. Unterhalb des Pinchpunktes liegt die Badheizung und die verbleibenden Abluft- resp. Abgasströme, die nun für die Badheizung verwendet werden können.

Abbildung 27 zeigt das Wärmetauschernetzwerk mit Abwärmenutzung. Der erhöhte Massestrom aus der Kammer des Haftwassertrockners kann gut 90 Kilowatt an die Badheizung beitragen. Zusammen mit Abwärme aus der Kammer des EPS-Ofens aus den Brüden des Email-Ofens kann die Vorbehandlung fast vollständig beheizt werden.

Beim Schlickertrockner kann die Verbrennungsluft mit der Kammerabluft vorgewärmt werden. Die Leistung ist mit 2,8 Kilowatt sehr gering.

Für die Rauchgase des EPS-Ofens sind zwei Verwendungen denkbar, einerseits für die Vorwärmung der Verbrennungsluft, andererseits für die Badheizung. Bei der Badheizung kann die hohe Ausgangstemperatur von 260°C besser ausgenützt werden. In diesem Fall macht es sogar Sinn, Wärme über den Pinch-Punkt auszutauschen und die Abgase in einem Wärmetauscher von 260°C auf 80°C abzukühlen. Die nutzbare Leistung erhöht sich auf 15,3 Kilowatt. Um diesen Wärmetauscher im PinCH-Tool darzustellen, müsste ein sogenanntes „Relaxed HEN“ aufgebaut werden, was aber wegen einem einzelnen Wärmetauscher wenig Sinn macht.

Im Bereich von 80°C bis 20°C verbleibt noch eine beträchtliche Leistung, die für die Gebäudeheizung verwendet werden kann.

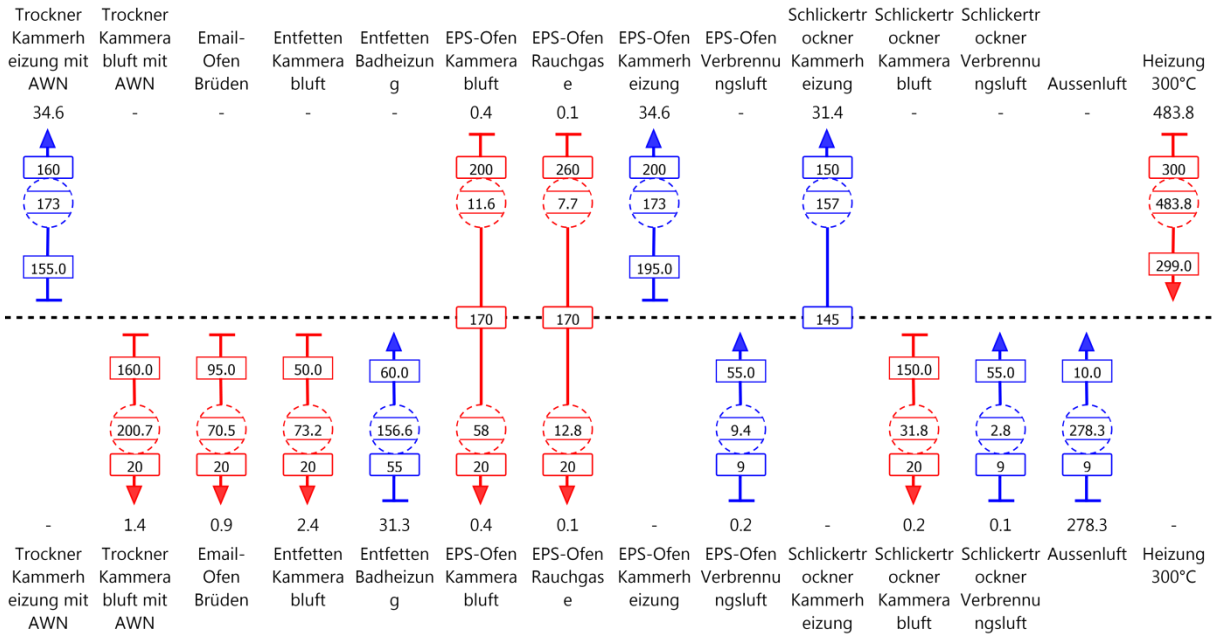


Abbildung 26 Heat Exchanger Network, dTmin 25°C

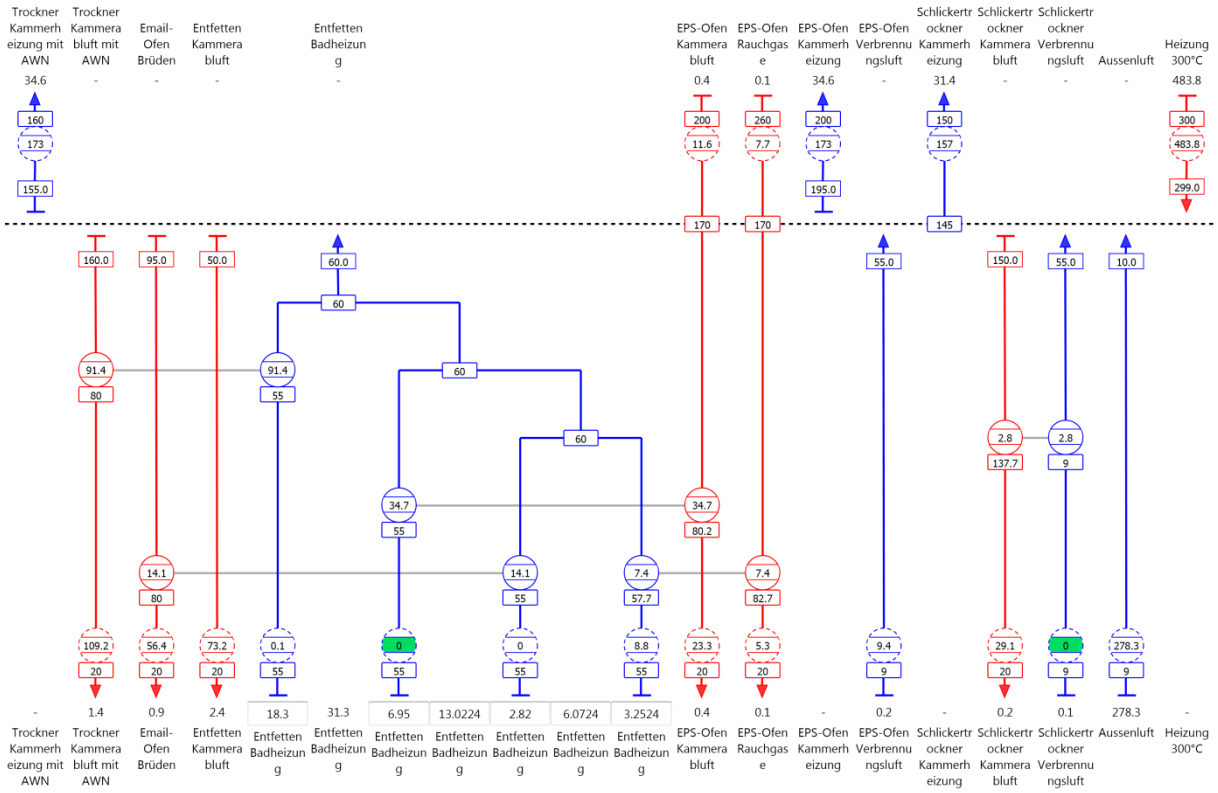


Abbildung 27 Heat Exchanger Network mit AWN, dTmin 25°C

7 Massnahmenliste

7.1 Massnahmen aus Pinch-Analyse

Zusammenfassend ergeben sich die Massnahmen gemäss Tabelle 3, die zusammen ein Energie-Rückgewinnungspotenzial von 253 Kilowatt beinhalten. Wählt man bei der ersten Modellierung mit PinCH, der ersten Target Group mit allen Prozessströmen, ein delta Tmin von 25°C, so ergibt sich ein theoretisches Wärmerückgewinnungspotenzial von 288 Kilowatt. Davon können mit den 6 Massnahmen 88% realisiert werden.

Nr.	Massnahme	Form der Nutzung	Leistung Wärmetauscher /Wärmestrom [kW]	Nutzungs-zeit [h]	Einspar-potenzial [MWh]	Priorität
1	Rauchgase Email-Ofen an Trockner, abzüglich Mehrverbrauch beim Schlickertrockner	direkte Einleitung der Rauchgase	100	2'250	225 -100	1
2	Wärme Kammerabluft Trockner an Badheizung	Wärmetauscher Luft/Wasser	91	2'250	205	1
3	Wärme Kammerabluft EPS-Ofen an Badheizung	Wärmetauscher Luft/Wasser	27 - 34	2'250	61 - 77	3
4	Wärme Brüden Email-Ofen an Badheizung	Wärmetauscher Luft/Wasser	14	2'875	40	3
5	Wärme Rauchgase EPS-Ofen an Badheizung	Wärmetauscher Luft/Wasser	15	2'250	34	2
6	Vorwärmung Verbrennungsluft Schlickertrockner	Wärmetauscher Luft/Wasser	3	1'250	4	4
	Total		253		477	

Tabelle 3 Massnahmen aus der Pinch-Analyse

Die Prioritäten wurden entsprechend dem Einsparpotenzial und der Machbarkeit der Massnahmen gewählt.

- Die Massnahmen 1 und 2 beinhalten grosse Einsparpotenziale und können ohne technische Probleme realisiert werden. Diese zwei Massnahmen erbringen bereits 75% des Einsparpotenzials.
- Massnahme 5 ist technisch problemlos zu realisieren, erbringt aber nur eine geringe Einsparwirkung.
- Bei der Umsetzung der Massnahme 3 tritt erschwerend auf, dass die Kammerabluft des EPS-Ofens mit Spaltprodukten der Lacke behaftet ist. Die Abluft darf nicht zu stark abgekühlt werden, damit sich die Rückstände nicht im Tauscher niederschlagen. Die Massnahmenwirkung wurde für Austrittstemperaturen von 100°C und 80°C berechnet.
- Die Massnahme 4 stösst beim Anlagenbetreiber auf Widerstände. Der Email-Ofen ist im Betrieb sehr heikel, jede Veränderung an Druckverhältnissen kann die Qualität der resultierenden Beschichtung beeinträchtigen. Daher ist es fraglich, ob die Massnahme 4 umgesetzt wird.
- Die Massnahme 6 erbringt wegen der geringen Leistung und der geringen Laufzeit nur eine sehr kleine Einsparwirkung. Sie kann nur zur Umsetzung empfohlen werden, wenn die technische Umsetzung sehr einfach und kostengünstig erfolgen kann.

Bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit ist zudem zu beachten, dass die Massnahme als Ersatz einer bestehenden Abwärmenutzung zu betrachten ist. Die Rauchgase des Email-Ofens werden heute zur Vorwärmung des Schlickertrockners verwendet. Da der Schlickertrockner nur an 1‘000 Stunden pro Jahr in Betrieb ist, kann nur ein geringer Teil der Wärme genutzt werden:

- Bereitschaft: 1‘875 Stunden pro Jahr
  (Laufzeit Email-Ofen inkl. Aufheizzeit: 2‘875 Stunden, Betriebszeit Schlickertrockner 1‘000 Stunden, Differenz 1‘875 Stunden)

Wärmeabgabe der Email-Ofens	100 kW	188 MWh	ungenutzt

- Betrieb: 1‘000 Stunden

Wärmeabgae des Email-Ofens	100 kW	100 MWh	genutzt

Die Massnahmenwirkung errechnet sich aus der Differenz der bisher genutzten 100 MWh und dem Potenzial vom Massnahme 1 von 225 MWh, total 125 MWh.

7.2 Wirtschaftlichkeit

7.2.1 Massnahme 1

Für Massnahme 1 muss der Abgasstrom des Email-Ofens, der heute in den Schlickertrockner geführt wird, neu in den Haftwassertrockner umgeleitet werden. Die bestehende Verbindung kann bestehen bleiben und muss vom Schlickertrockner zum Haftwasserstrockner verlängert werden. Der Kanal zum Schlickertrockner soll weiterhin aufrecht erhalten bleiben, damit beim geringsten Einfluss auf den Betrieb des Email-Ofens die alte Situation wiederhergestellt werden kann. Abbildung 28 zeigt ein Prinzipschema der neuen Situation.

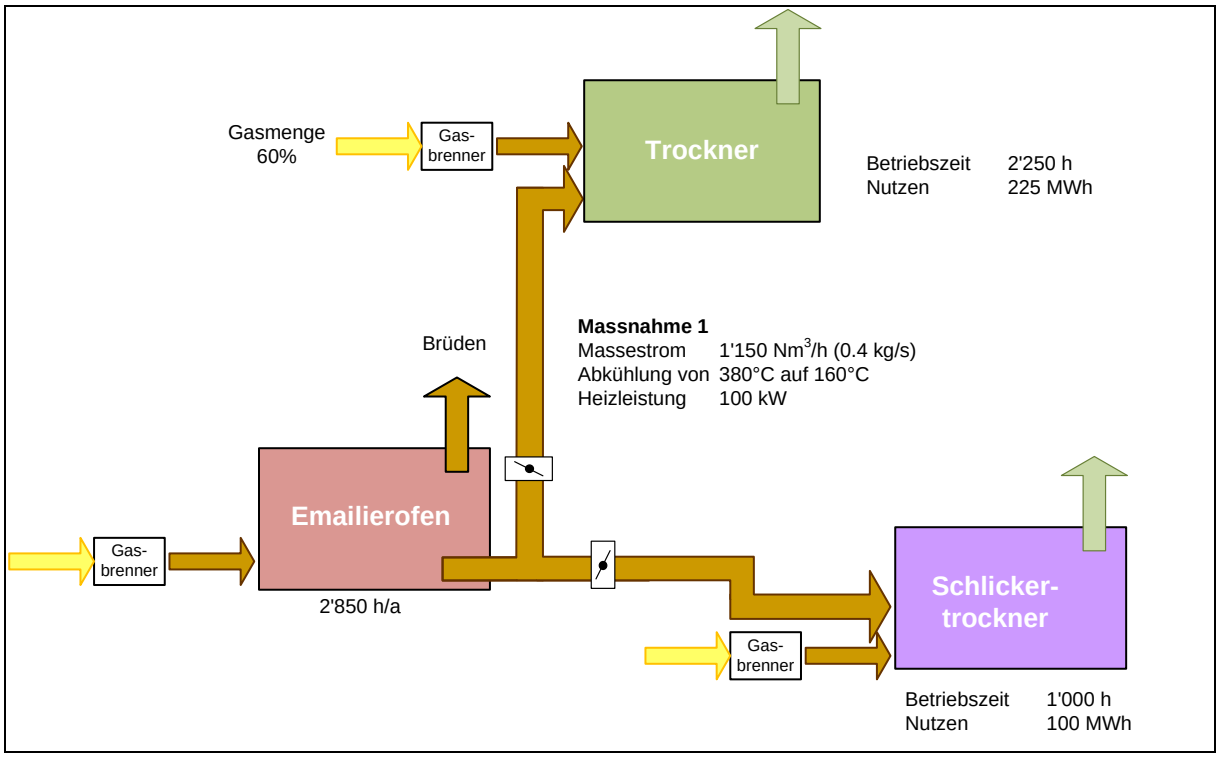


Abbildung 28 Realisierungsvorschlag für Massnahme 1

Erforderliche Umbauten:

- Verlängerung des gedämmten Rauchrohres vom Schlickertrockner zum Haftwassertrockner, Einbau von handbetriebenen Klappen
- Vergrösserung des Abluftkanals beim Haftwassertrockner, Einbau eines stärkeren Ventilators

Wirtschaftlichkeit:

• Umsetzungskosten	CHF 30‘000.-
• Energieeinsparung	125 MWh
• Kosteneinsparung	CHF 10‘000.-
• einfache Rückzahldauer	3 Jahre.

7.2.2 Massnahmen 2 bis 5

Für die Massnahmen 2 bis 5 müssen Wärmetauscher in den Rauchrohren, resp. in der Kammerabluft von Haftwassertrockner und EPS-Ofen, sowie im Brüden des Email-Ofens platziert werden. Wasserseitig werden alle Wärmequellen parallel geschaltet. Ein Speicher von 5‘000 Liter Inhalt kann die Wärme während rund einer halben Stunde puffern, falls Ofen und Vorbehandlung nicht gleichzeitig ausgelastet sind. Über eine einfache Steuerung werden die Umwälzpumpen bei jedem Wärmetauscher eingeschaltet, sobald die Abluft resp. die Rauchgase eine bestimmte Temperatur übersteigen. Der Gaskessel bleibt als Leistungsreserve und für das Anfahren der Vorbehandlung in Serie geschaltet. Abbildung 29 zeigt ein Prinzipschema des Massnahmenvorschlages.

Der Wärmetauscher in der Abluft des Haftwassertrockners erbringt alleine schon eine Leistung von 90 Kilowatt und die technische Realisierung stösst auf keine Hindernisse. Diese Massnahme soll mit erster Priorität umgesetzt werden.

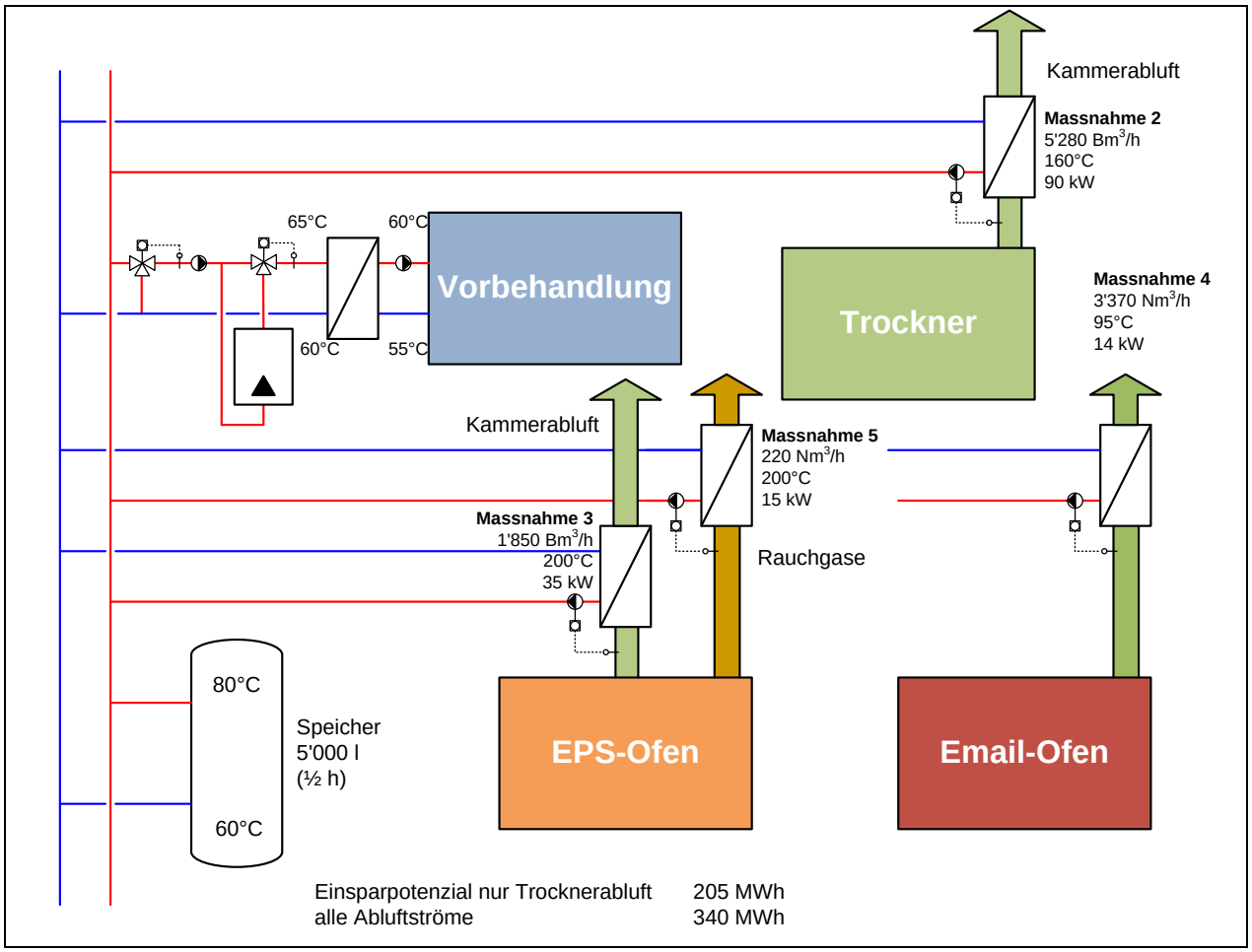


Abbildung 29 Realisierungsvorschlag für Massnahmen 2 bis 5

Wirtschaftlichkeit Wärmetauscher Haftwassertrocknerabluft (Massnahme 2):

- Umsetzungskosten inkl. Speicher und neue Kesseleinbindung CHF 61‘000.-
- Energieeinsparung 205 MWh
- Kosteneinsparung CHF 16‘400.-
- einfache Rückzahldauer 3,7 Jahre.

Mit zweiter Priorität folgt der Wärmetauscher im Rauchgas des EPS-Ofens. Das Wärmerückgewinnungspotenzial ist zwar nur gering, die Umsetzung stösst aber auf keine Hindernisse.

Wirtschaftlichkeit Wärmetauscher Rauchgase EPS-Ofen (Massnahme 5):

- Umsetzungskosten CHF 14‘000.-
- Energieeinsparung 34 MWh
- Kosteneinsparung CHF 2‘700.-
- einfache Rückzahldauer 5 Jahre.

Die Kammerabluft des EPS-Ofens hat eine höhere Heizleistung, enthält aber Spaltprodukt der Pulverlacke. Es muss vermieden werden, dass diese Rückstände sich im Tauscher niederschlagen, daher kann die Luft nicht unter rund 100°C abgekühlt werden. Für die Wirtschaftlichkeitsrechnung wird der Minimalwert der Einsparung von 61 MWh eingesetzt:

Wirtschaftlichkeit Wärmetauscher Kammerabluft EPS-Ofen (Massnahme 3):

- Umsetzungskosten CHF 22‘000.-
- Energieeinsparung 61 MWh
- Kosteneinsparung CHF 4‘900.-
- einfache Rückzahldauer 4,5 Jahre.

Weitere Schwierigkeiten ergeben sich bei der Nutzung der Brüden-Abwärme des Email-Ofens. Die Temperatur der Brüden beträgt nach dem Fluor-Abscheider nur noch 95°C, das ergibt eine grosse Wärmetauscherfläche zur Übertragung der Wärme an das Heizwasser. Zudem darf durch den Wärmetauscher die Abluft im Kanal nicht gestaut werden, damit die Druckverhältnisse im Ofen unverändert bleiben.

Wirtschaftlichkeit Wärmetauscher Brüden Email-Ofen (Massnahme 4):

- Umsetzungskosten CHF 36‘000.-
- Energieeinsparung 40 MWh
- Kosteneinsparung CHF 3‘200.-
- einfache Rückzahldauer 11 Jahre.

7.3 Weitere Massnahmen

Im Verlauf der Pinch-Analyse haben sich Ideen für weitere Massnahmen ergeben, die mit den Anlagenherstellern und dem Anlagenbetreiber diskutiert werden müssen.

7.3.1 Vorbehandlung optimieren

Die Vorbehandlung wird heute mit einer Abluftmenge von 8‘000 m^3/h betrieben. Gemäss Anlagendokumentation sind 6‘000 m^3/h vorgesehen. Eine Reduktion auf den Auslegungswert vermindert den Energieaufwand zum Aufheizen der nachströmenden Hallenluft, zudem wird weniger Verdunstungswärme aus dem Sprühbad abgeführt. Die Heizleistung der Vorbehandlung kann um 25% reduziert werden.

- Investitionskosten keine
- Energieeinsparung 95 MWh
- jährliche Kosteneinsparung CHF 7‘600.-

Die Brennerleistung des Kessels für die Beheizung des Entfettungsbades beträgt 640 kW, die mittlere Heizleistung über die Nutzungszeit von 2‘250 Stunden beträgt lediglich 169 kW. Der Brenner erreicht heute schon weniger als 600 Vollbetriebsstunden pro Jahr. Auch ohne die oben beschriebenen Massnahmen kann die Brennerleistung halbiert werden. Ohne Abwärmenutzung reduziert sich der Gasverbrauch um rund 3%.

- Investitionskosten CHF 1‘000.-
- Energieeinsparung 3% 11 MWh
- jährliche Kosteneinsparung CHF 880.-
- einfache Rückzahldauer 1 Jahr.

7.3.2 Optimierung des Haftwassertrockners

Der Prozess der Haftwassertrocknung hat eine geringe Energieeffizienz. Um das Wasser zu verdunsten, sind die folgenden Energieströme unabdingbar notwendig:

- Objekte aufheizen 13 kW
- Wasser aufheizen 7 kW
- Wasser verdunsten 46 kW
- total 66 kW

Die mittlere Leistungsaufnahme des Haftwassertrockners beträgt aber 275 kW, der energetische Wirkungsgrad des Trockners beträgt lediglich 25%. Die Abwärme in der Trocknerabluft kann mit den oben vorgeschlagenen Massnahmen für die Beheizung des Entfettungsbades genutzt werden. Die grössten ungenutzten Abwärmeströme ergeben sich durch das Aufheizen der schweren Förderkette und den Wärmeverlust durch die offen stehenden Ein- und Austrittsöffnungen:

- Kette aufheizen geschätzt 80 MWh pro Jahr Kosten CHF 6‘400.-
- Wärmeverlust durch Öffnungen geschätzt 100 MWh pro Jahr Kosten CHF 8‘000.-

Mit den Anlagenherstellern muss abgeklärt werden, ob diese Wärmeverluste durch einfache konstruktive Massnahmen vermindert werden können. Rechnet man die Energieeinsparung über fünf Jahre, so stehen für derartige Massnahmen Investitionskosten von CHF 30‘000.- bis 40‘000.- pro Massnahme zur Verfügung.

8 Empfehlung

Wir empfehlen der V-ZUG AG die Massnahmen 1, 2 und 5 zur unmittelbaren Umsetzung. Bei Investitionskosten von CHF 105‘000.- können Einsparungen von 364 MWh resp. CHF 29‘000.- an Energiekosten erzielt werden.

Die Massnahme 1 reduziert den Gasverbrauch für den Haftwassertrockner um 225 MWh, während beim Schlickertrockner ein Mehrverbrauch von 100 MWh entsteht. Es ergibt sich eine Nettoeinsparung von 125 MWh oder 19% auf den heutigen Verbrauch von 660 MWh für diese beiden Anlagenteile.

Die Massnahmen 2 und 5 reduzieren den Gasverbrauch für die Vorbehandlung um 239 MWh, das entspricht 63% des heutigen Verbrauchs von 380 MWh. Durch Betriebsoptimierung, d.h. Reduktion der Abluftmenge auf den Auslegungswert, kann der Gasverbrauch weiter reduziert werden.

Bei der Massnahme 3 muss sichergestellt werden, dass sich im Wärmetauscher keine Lackrückstände ablagern. Die Firma E. Luterbach AG in Hildisrieden hat diesbezüglich schon Erfahrungen gesammelt und kann für die Umsetzung der Massnahme beigezogen werden. Unter diesen Voraussetzungen kann die Massnahmen zur Umsetzung empfohlen werden.

Die Massnahme 4 hat eine sehr lange Rückzahldauer von mehr als 10 Jahren. In dieser Form ist die Nutzung der Brüdenabwärme nicht wirtschaftlich. Wir empfehlen der V-ZUG AG mit dem Anlagenhersteller abzuklären, ob die Wärme vor dem Fluor-Abscheider auf einem höheren Temperaturniveau gefasst werden kann.

Wegen der geringen Laufzeit des Schlickertrockners hat die Massnahme 6 nur eine sehr geringe Einsparwirkung. Wir empfehlen die Massnahme nicht zur Umsetzung. Sollte der Schlickertrockner in Zukunft viel längere Betriebszeiten haben, so kann diese Massnahme ohne technische Probleme umgesetzt werden.

Beim Haftwassertrockner empfehlen wir, zusammen mit dem Anlagenhersteller abzuklären, ob die Wärmeverluste über die Ein- und Austrittsöffnungen und über die Kette mit einfachen konstruktiven Massnahmen verringert werden können.

9 Literaturverzeichnis

Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2006) *Energieeinsparung in Lackierbetrieben – Langfassung*, http://www.lfu.bayern.de/luft/fachinformationen/co2_minderung/, Augsburg, 2006

Gloor, R. (1996) *Energiesparmöglichkeiten in der Lackiertechnik*, RAVEL-Dokumentation Nr. 724.397.21.07 D, 1996, www.energie.ch

Grieder, T. (2010) *Pinch-Pilot II – Erprobung Pinchlight, Projekt Ramseier AG,* Bundesamt für Energie, Bern 2010

Olsen, D., Wellig, B. (2010) *PinCH: An Analysis Tool for the Process Industries,* 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS), Lausanne, June 14-17, 2010.

10 Anhangsverzeichnis

Anhang 01: Prozesschema 31

Anhang 02: Prozessschema für Pinch-Analyse 32

Anhang 03: Berechnung der Energieflüsse 33

Anhang 04: Energieflussdiagramm 36

Anhang 05: Stromtabellen für die Pinch-Analyse 37

Anhang 06: Wärmetauscher-Netzwerk dTmin 85°C 38

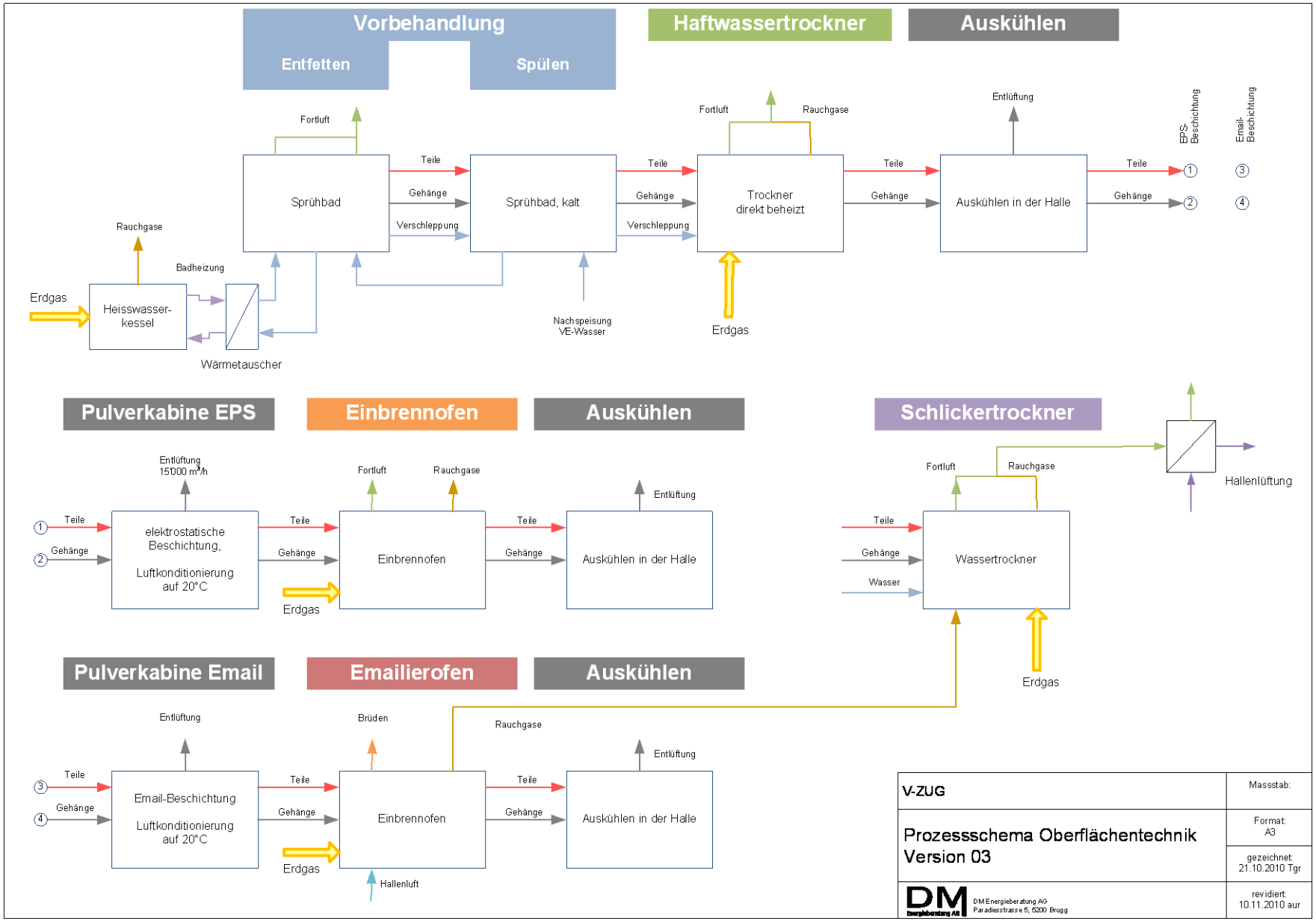
Anhang 07: Wärmetauscher-Netzwerk dTmin 25°C 39

Anhang 08: Konzept Massnahme 1 40

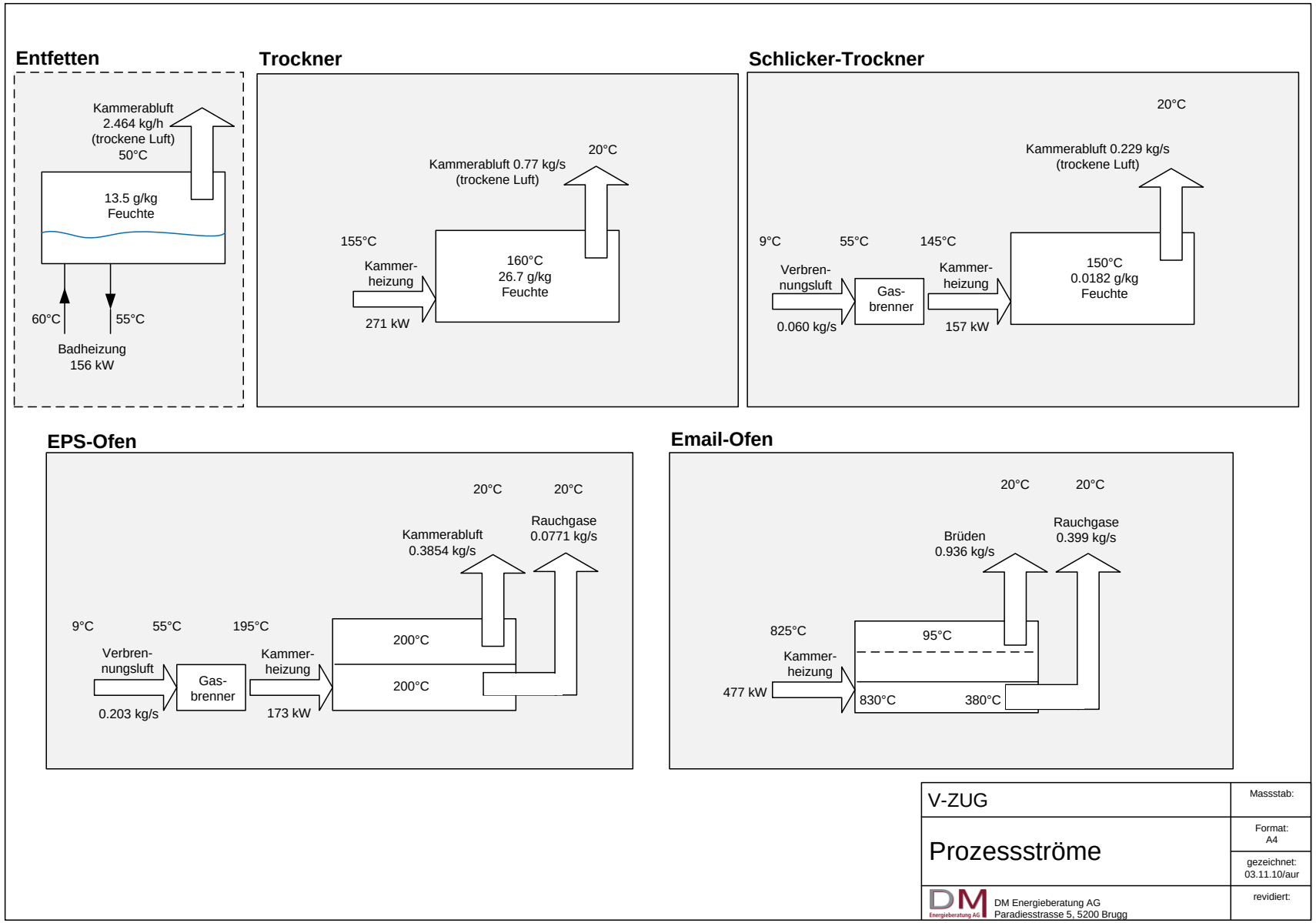
Anhang 09: Konzept Massnahme 2 41

© DM Energieberatung AG: gespeichert 14.01.11/bfe_Projektschlussbericht_V-Zug_v02.doc/Tgr

Anhang 01: Prozesschema



Anhang 02: Prozessschema für Pinch-Analyse



Anhang 03: Berechnung der Energieflüsse

Entfettungsbad

Energieflüsse	Anfangs-temp. [°C]	Endtemp. [°C]	Differenz [°C]	Medium	Menge [kg/h]	spez. Wärme [kJ/kg.K]	mittlere Leistung [kW]	jährliche Energiemenge [MWh]
Objekte aufheizen	20	35	15	Stahl	1260	0.46	2	5
Gehänge aufheizen	20	35	15	Stahl	360	0.46	1	2
Wasser aufheizen	20	55	35	Wasser	200	4.19	8.1	18
Wasser verdunsten	50	20	0	Wasser	120	2257	75	169
Abluft Kammer aufheizen	20	50	30	Luft	6'957 Nm3/h	1.15 kJ/m3	67	150
Wärmeverluste durch Transmission	55	20	35	Wärme	156 m2	1.00 W/m2.K	2	3
Total Nutzenergie							155	348

Haftwassertrockner

Energieflüsse	Anfangs-temp. [°C]	Endtemp. [°C]	Differenz [°C]	Medium	Menge [kg/h]	spez. Wärme [kJ/kg.K]	mittlere Leistung [kW]	jährliche Energiemenge [MWh]
Objekte aufheizen	20	100	80	Stahl	1260	0.46	13	29
Gehänge aufheizen	20	100	80	Stahl	360	0.46	4	8
Kette aufheizen	20	100	80	Stahl	3600	0.46	37	83
Wasser aufheizen	18	100	82	Wasser	74	4.19	7	16
Wasser verdunsten	160	160	0	Wasser	74	2'257 kJ/kg	46	104
Abluft Kammer aufheizen	20	160	140	Luft	2'175 Nm3/h	1.15 kJ/m3.K	97	219
Wärmeverlust durch offene Türen	160	20	140	Luft	1'000 m3/h	1.15 kJ/m3.K	45	101
Wärmeverluste durch Transmission	160	20	140	Wärme	364 m2	0.50 W/m2.K	25	57
Total Endenergie							275	618

EPS-Ofen

Energieflüsse	Anfangstemp. [°C]	Endtemp. [°C]	Differenz [°C]	Medium	Menge [kg/h]	spez. Wärme [kJ/kg.K]	mittlere Leistung [kW]	jährliche Energiemenge [MWh]
Objekte aufheizen	20	150	130	Stahl	1260	0.46	20.9	47
Gehänge aufheizen	20	150	130	Stahl	180	0.46	3.0	7
Kette aufheizen	20	90	70	Stahl	3600	0.46	32.2	72
Abluft Kammer aufheizen	20	200	180	Luft	1'088 Nm3/h	1.15 kJ/m3.K	62.7	141
Wärmeverlust durch offene Türen	200	20	180	Luft	300 m3/h	1.15 kJ/m3.K	17.3	39
Wärmeverluste durch Transmission	200	20	180	Wärme	232 m2	0.50 W/m2.K	20.9	47
Total Nutzenergie							157	353
Total Endenergie							176	397

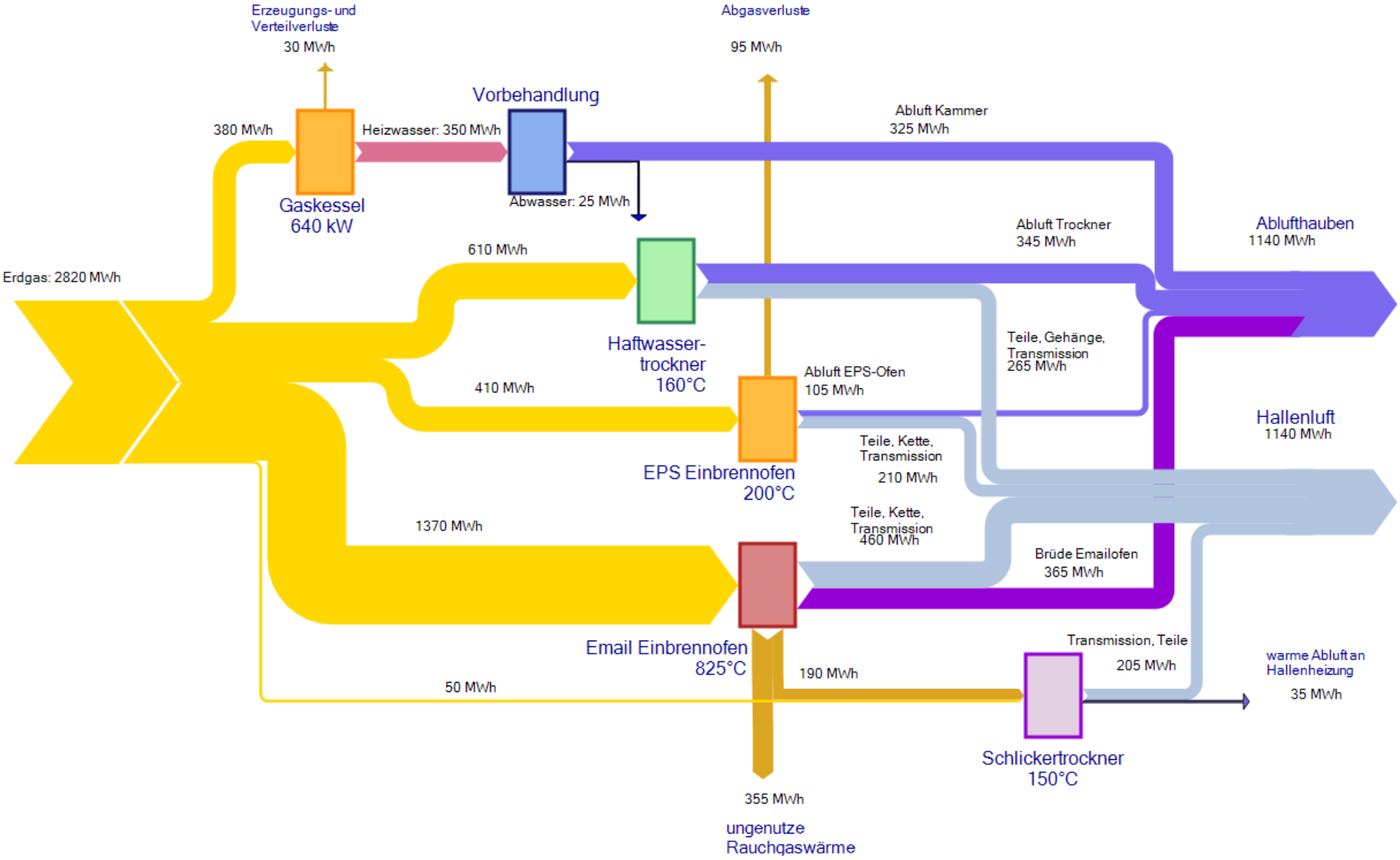
Email-Ofen

Energieflüsse	Anfangstemp. [°C]	Endtemp. [°C]	Differenz [°C]	Medium	Menge [kg/h]	spez. Wärme [kJ/kg.K]	mittlere Leistung [kW]	jährliche Energiemenge [MWh]
Objekte aufheizen	20	200	180	Stahl	260	0.46	6.0	13
Traversen aufheizen	20	200	180	Stahl	2760	0.46	63.5	143
Kette aufheizen	20	200	180	Stahl	3600	0.46	82.8	186
Brüden aufheizen	20	175	155	Luft	2'643 Nm3/h	1.15 kJ/m3.K	131.1	377
Abgase aufheizen	20	420	400	Abgase	1'150 Nm3/h	1.38 kJ/m3.K	176.3	507
Wärmeverlust durch offene Türen	60	20	40	Luft	600 m3/h	1.15 kJ/m3.K	7.7	22
Wärmeverluste durch Transmission	400	20	380	Wärme	232 m2	0.50 W/m2.K	44.1	127
Total Endenergie							511	1'375

Schlickertrockner

Energieflüsse	Anfangstemp. [°C]	Endtemp. [°C]	Differenz [°C]	Medium	Menge [kg/h]	spez. Wärme [kJ/kg.K]	mittlere Leistung [kW]	jährliche Energiemenge [MWh]
Objekte aufheizen	20	150	130	Stahl	260	0.46	4.3	5
Traversen aufheizen	20	110	90	Stahl	2'760	0.46	31.7	40
Kette aufheizen	20	110	90	Stahl	3'600	0.46	41.4	52
Abluft Kammer aufheizen	20	150	130	Luft	467 Nm3/h	1.15 kJ/m3.K	19.4	24
Wasser aufheizen	20	100	80	Wasser	15 kg/h	4.19	1.4	2
Wasser verdunsten	150	150	0	Wasser	15 kg/h	2257 kJ/kg	9.4	12
Wärmeverlust durch offene Türen	150	20	130	Luft	1'000 m3/h	1.15 kJ/m3.K	41.6	52
Wärmeverluste durch Transmission	150	20	130	Wärme	79 m2	1.00 W/m2.K	10.3	13
Total Nutzenergie							160	199

Anhang 04: Energieflussdiagramm



Anhang 05: Stromtabellen für die Pinch-Analyse

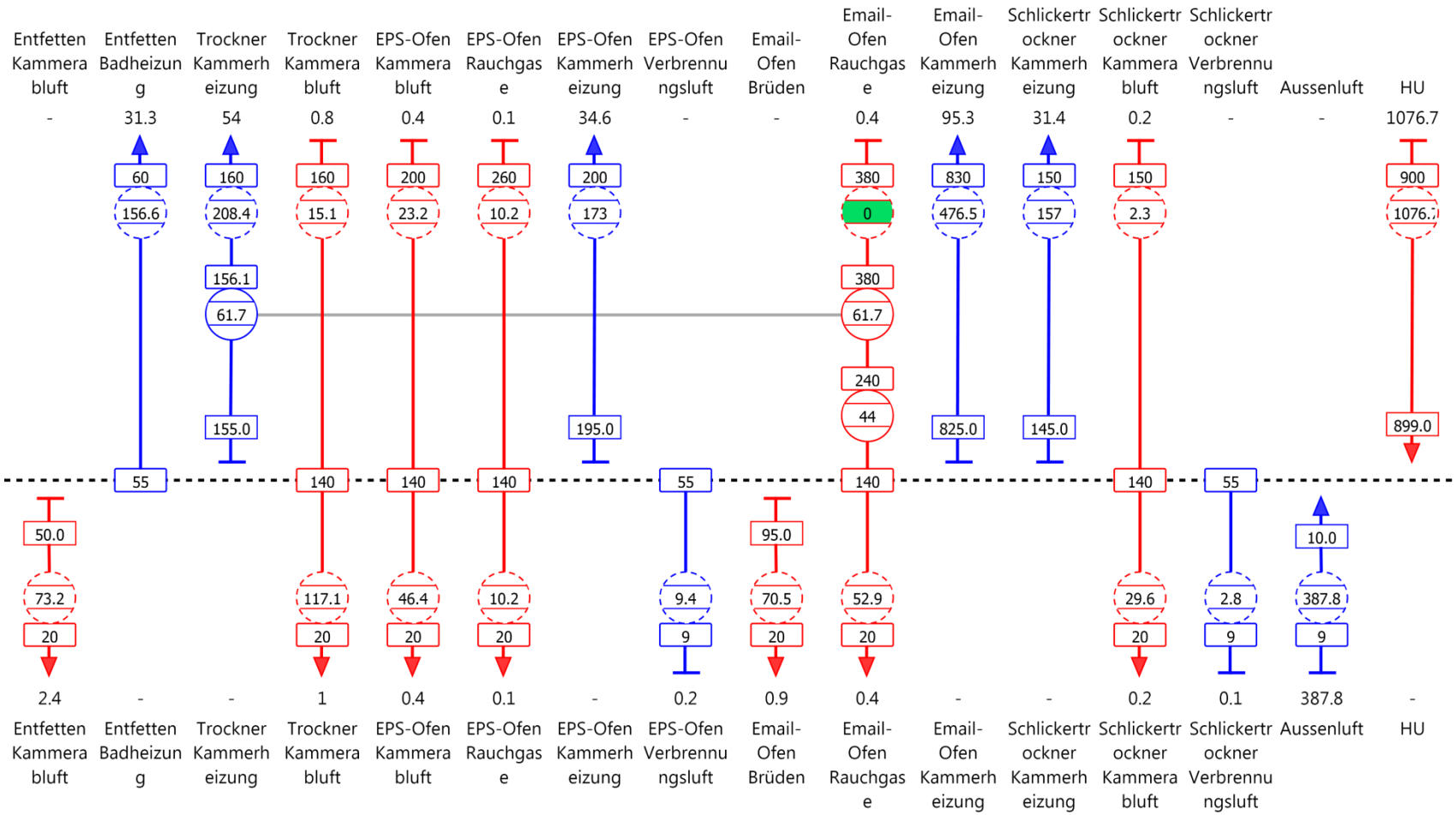
erste Target Group (Originalzustand)

Name	Hot/Cold	Tin	Tout	Flow	Cp	Phase Change	Alpha	Pressure	Fluid	Humidity Ratio	Soft	TStart	TStop
Entfetten Badheizung	Cold	55	60	1.86	16.840	0	1000	1	Simple	0.0050	no	0	0
Entfetten Kammerabluft	Hot	50	20	2.464	0.991	0	50	1	HumidAir	0.0135	no	0	0
Trockner Kammerheizung	Cold	155	160	49.1	1.100	0	50	1	Simple	0.0050	no	0	0
Trockner Kammerabluft	Hot	160	20	0.77	1.303	0	-	1	HumidAir	0.0267	no	0	0
EPS-Ofen Verbrennungsluft	Cold	9	55	0.2025	1.004	0	100	1	HumidAir	0.0000	no	0	0
EPS-Ofen Kammerheizung	Cold	195	200	34.6	1.000	0	50	1	Simple	0.0050	no	0	0
EPS-Ofen Rauchgase	Hot	260	20	0.0771	1.104	0	50	1	Simple	0.0000	no	0	0
EPS-Ofen Kammerabluft	Hot	200	20	0.3854	1.004	0	50	1	HumidAir	0.0000	no	0	0
Email-Ofen Kammerheizung	Cold	825	830	95.3	1.000	0	50	1	Simple	0.0050	no	0	0
Email-Ofen Rauchgase	Hot	380	20	0.399	1.104	0	50	1	Simple	0.0000	no	0	0
Email-Ofen Brüden	Hot	95	20	0.936	1.004	0	50	1	HumidAir	0.0000	no	0	0
Schlickertrockner Verbrennungsluft	Cold	9	55	0.06	1.004	0	100	1	HumidAir	0.0000	no	0	0
Schlickertrockner Kammerheizung	Cold	145	150	31.4	1.000	0	50	1	Simple	0.0050	no	0	0
Schlickertrockner Kammerabluft	Hot	150	20	0.229	1.101	0	-	1	HumidAir	0.0182	no	0	0

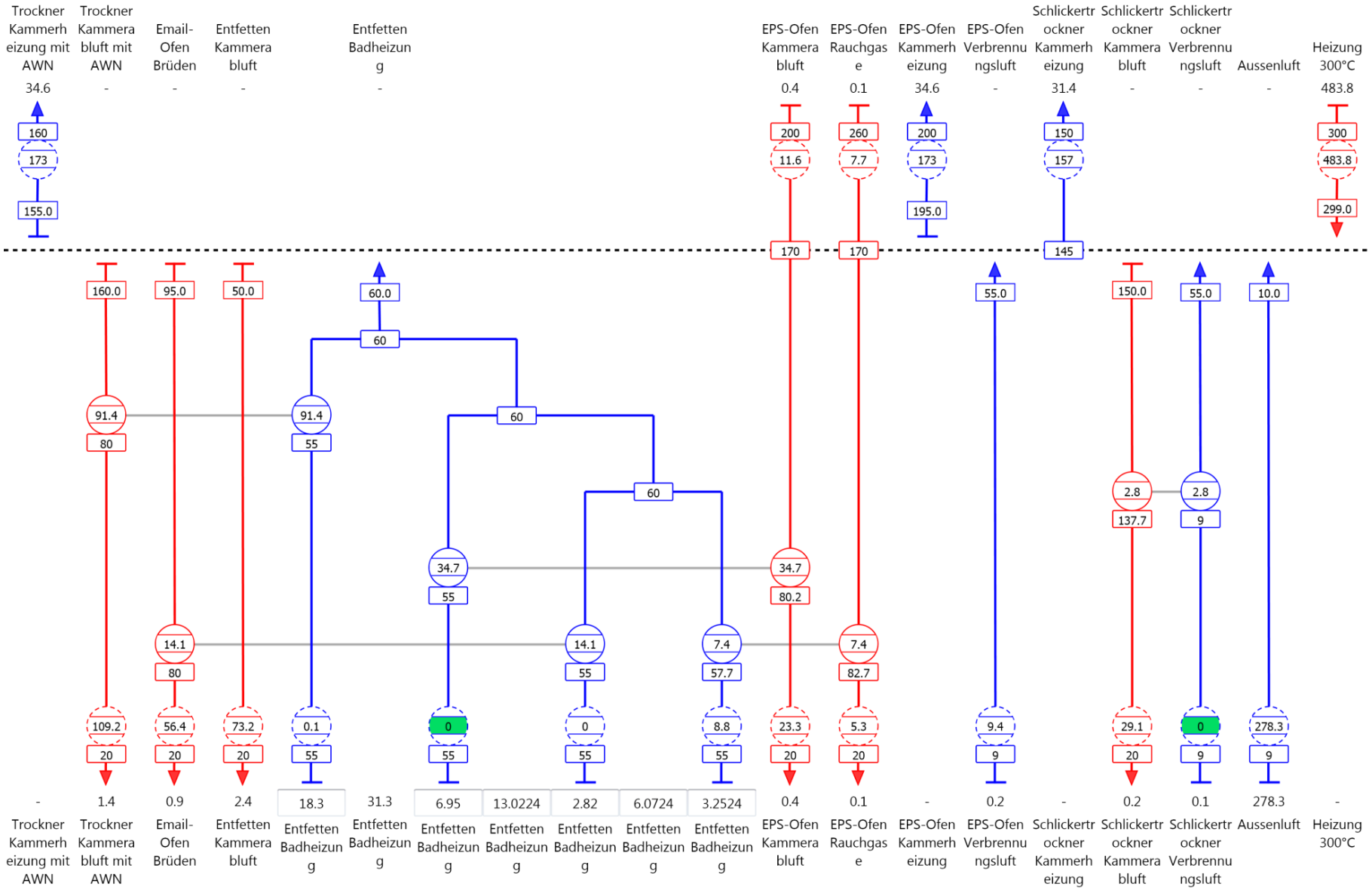
zweite Target Group (Rauchgase Email-Ofen in Trockner)

Name	Hot/Cold	Tin	Tout	Flow	Cp	Phase Change	Alpha	Pressure	Fluid	Humidity Ratio	Soft	TStart	TStop
Entfetten Badheizung	Cold	55	60	1.860	16.840	0	1000	1	Simple	0.005	no	0	0
Entfetten Kammerabluft	Hot	50	20	2.464	0.991	0	50	1	HumidAir	0.0135	no	0	0
EPS-Ofen Kammerheizung	Cold	195	200	34.600	1.000	0	50	1	Simple	0.005	no	0	0
EPS-Ofen Rauchgase	Hot	260	20	0.077	1.104	0	50	1	Simple	0	no	0	0
EPS-Ofen Kammerabluft	Hot	200	20	0.385	1.004	0	50	1	HumidAir	0	no	0	0
Email-Ofen Brüden	Hot	95	20	0.936	1.004	0	50	1	HumidAir	0	no	0	0
Schlickertrockner Kammerheizung	Cold	145	150	31.400	1.000	0	50	1	Simple	0.005	no	0	0
Schlickertrockner Kammerabluft	Hot	150	20	0.229	1.101	0	-	1	HumidAir	0.0182	no	0	0
EPS-Ofen Verbrennungsluft	Cold	9	55	0.203	1.004	0	100	1	HumidAir	0	no	0	0
Schlickertrockner Verbrennungsluft	Cold	9	55	0.060	1.004	0	100	1	HumidAir	0	no	0	0
Trockner Kammerheizung mit AWN	Cold	155	160	31.460	1.100	0	100	1	Simple	0.005	no	0	0
Trockner Kammerabluft mit AWN	Hot	160	20	1.169	1.303	0	-	1	HumidAir	0.0267	no	0	0

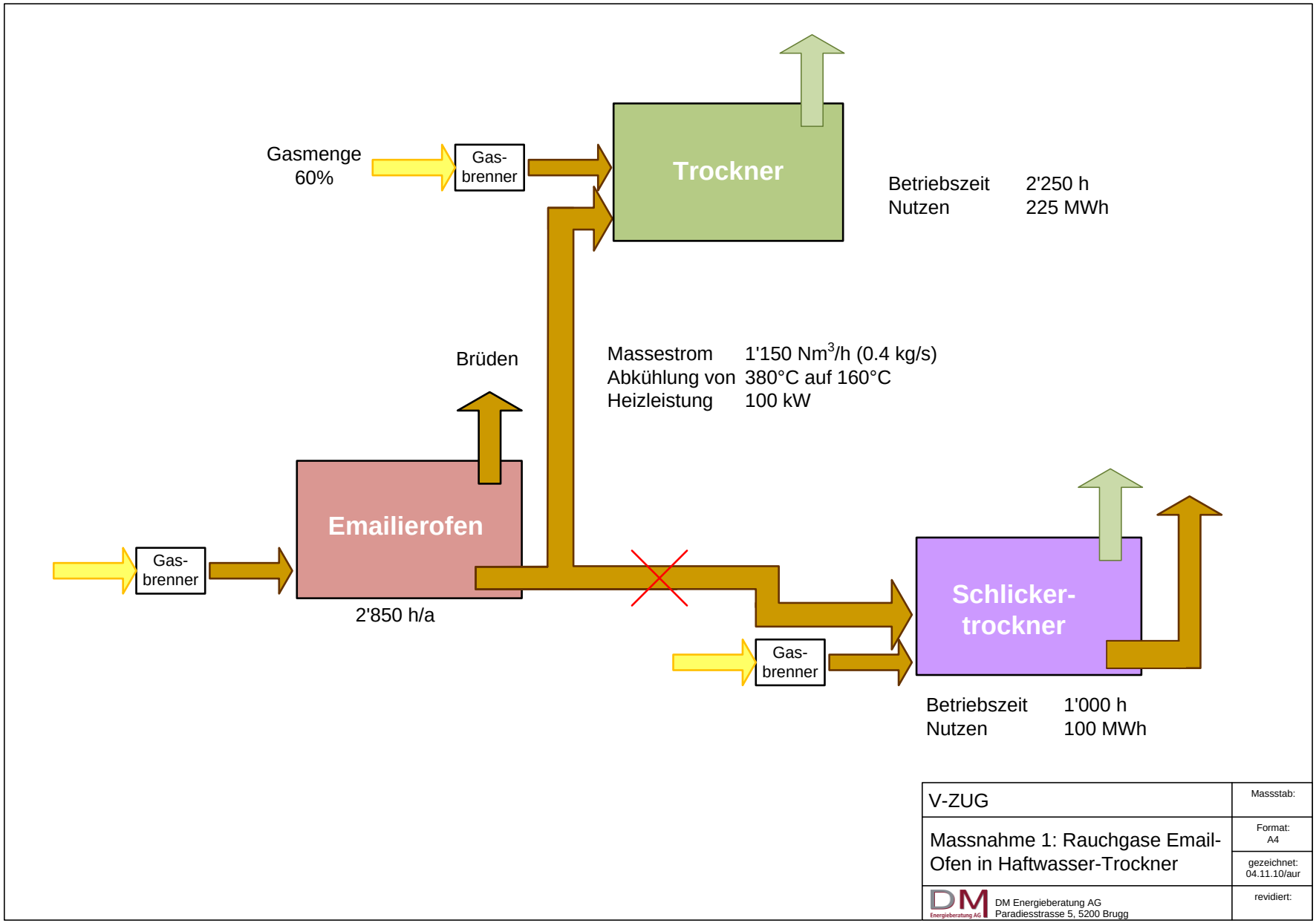
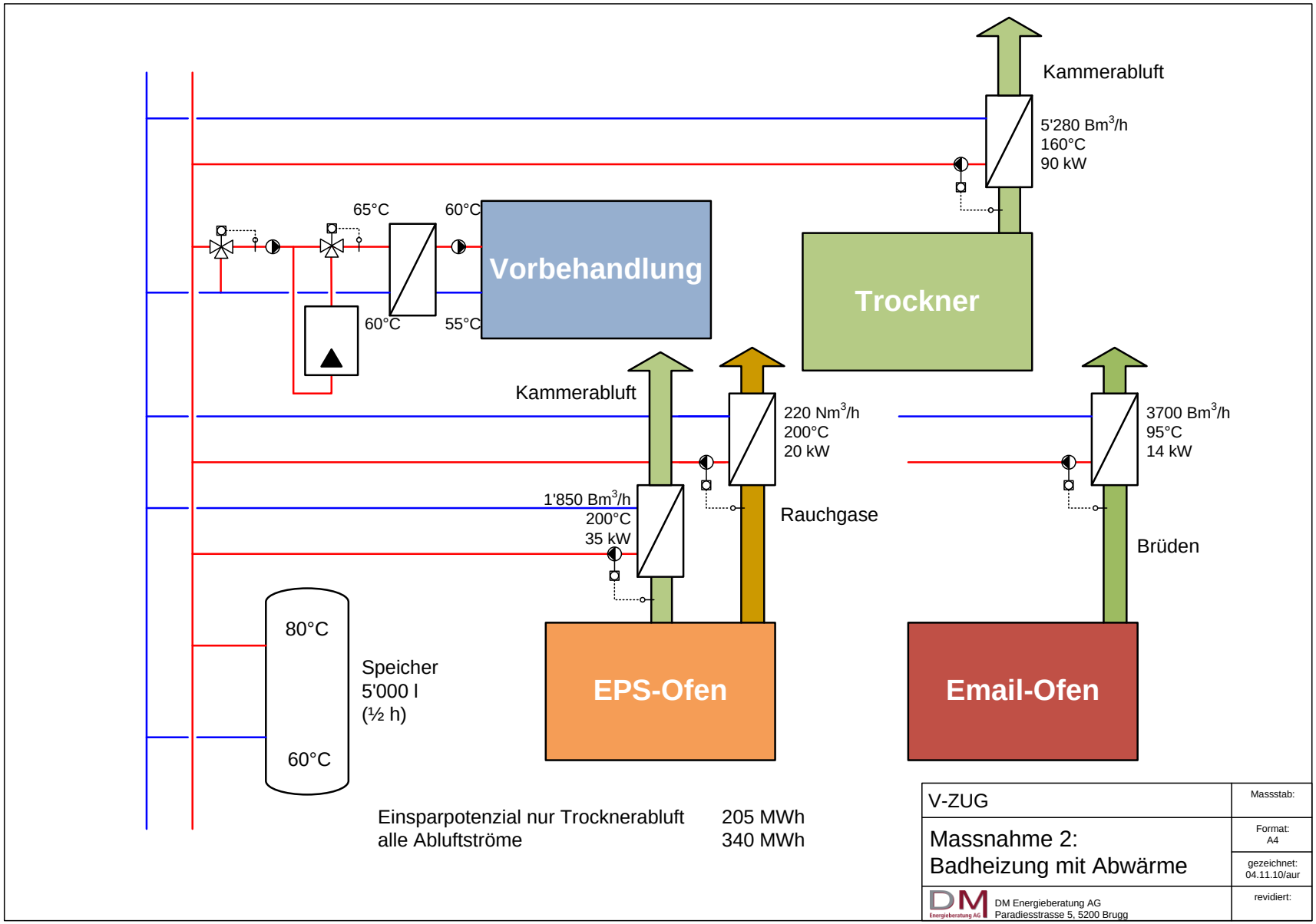
Anhang 06: Wärmetauscher-Netzwerk dTmin 85°C



Anhang 07: Wärmetauscher-Netzwerk dTmin 25°C



Anhang 08: Konzept Massnahme 1



Anhang 09: Konzept Massnahme 2