Schlussbericht 25. Juni 2014

Eternit (Schweiz) AG, Niederurnen

Pinch-Analyse Prozessanlagen und Heizungsanlagen

energieschweiz

Auftraggeber

Eternit (Schweiz) AG, 8867 Niederurnen

Auftragnehmer

Weisskopf Partner GmbH
Albisriederstrasse 184b
8047 Zürich

Autoren

Patrick Felder
Urs Flückiger
Thomas Weisskopf

Begleitperson

Martin Stettler, Bundesamt für Energie BFE

Die vorliegende Studie wurde vom BFE im Rahmen von EnergieSchweiz finanziell unterstützt. Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

EnergieSchweiz
Bundesamt für Energie BFE; Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: 3003 Bern
Tel. 058 462 56 11, Fax 058 463 25 00; contact@bfe.admin.ch; www.energie-schweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 4

1. Ausgangslage 6

1.1 Allgemein 6

1.2 Energiesituation 6

2. Pinch-Analyse 9

2.1 Vorgehen 9

2.2 Konzept 11

3. Massnahmen Prozessanlagen 22

3.1 Abluft-WRG und KVS 22

3.2 Massnahmen 22

4. Massnahmen Heizungsanlagen 25

4.1 Wärmeerzeugung 25

4.2 Wärmeverteilung 29

4.3 WRG Heizungsanlagen 33

4.4 Zusammenfassung Heizungsanlagen 34

5. Empfehlung 35

5.1 Prozessanlagen 35

5.2 Heizungsanlagen 35

Zusammenfassung

Eternit (Schweiz) AG stellt in Niederurnen hochwertige Fassaden- und Dachelemente sowie Platten aus Faserzement her. Der Energiebedarf von Eternit in Niederurnen betrug im Jahr 2012 10.5 GWh Erdgas, 202'000 Liter Heizöl und 9.4 GWh Strom.

Eternit ist Teilnehmerin am Energie-Modell der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW). Sie legt für die Befreiung von der CO_2-Abgabe dem Bund einen Zielvorschlag mit einem individuell festgelegten Emissionsziel vor.

Auf Grund der Grösse des Werkes von 84'000 m^2 und den zahlreichen thermischen Prozessanlagen wurde zur Ermittlung des Einsparpotenzials eine Pinch-Analyse durchgeführt. Neben den thermischen Prozessen wurden auch die weiteren grossen Energieverbraucher, insb. die Gebäude, ermittelt und analysiert.

In einem separaten Bericht wird der Zustand der wichtigsten technischen Einrichtungen beschrieben. Dieser dient einerseits der nötigen Ist-Zustand und Potenzialanalyse für den Zielvorschlag und andererseits auch der firmeneigenen Unterhaltplanung.

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass insbesondere die Heizungsanlagen und die Wärmeverteilung sehr grosse Energiemengen benötigen. Sie alleine verbrauchen ca. 60% des fossilen Energiebedarfs des Werks - dies obwohl die thermischen Prozessanlagen und die Druckluftkompressoren erhebliche Mengen an Abwärme in die Hallen abgeben. Die Hallen werden zudem oft als Lagerflächen verwendet, die theoretische Raumtemperaturen von max. 15°C benötigen. Heute werden die Hallen auf bis zu 22°C beheizt. Dieses Einsparpotenzial kann ausgeschöpft werden, indem die Heizungsanlagen schnell auf die internen Wärmequellen reagieren können und die Heizkurven gesenkt werden. Eine systematische Betriebsoptimierung mit partieller Anpassung der Wärmeabgabesysteme und deren Regelung muss hierzu durchgeführt werden. Dadurch können Einsparungen von mindestens 15% bzw. 1'000 MWh/a realisiert werden.

Im Rahmen der Analyse der Wärmeerzeugung wurde mit der Kehrichtverbrennung (KVA) Linthgebiet die Möglichkeit zur Fernwärmeversorgung diskutiert. Die KVA Linthgebiet und der Kanton Glarus haben dazu eine externe Studie in Auftrag gegeben. Resultate werden im Sommer 2014 erwartet.

Eine Alternative zur Fernwärme wäre eine grosse effiziente Grundwasser-Wärmepumpe unter verbesserter Nutzung der bestehenden Grundwasserbrunnen. Grundwasser wird zur Kühlung der Prozesse verwendet und fliesst mit Temperaturen von durchschnittlich 15-17°C zum Sickerbrunnen zurück. Die Wärmequelle für eine Grundwasser-Wärmepumpe ist temperaturmässig ideal.

Die Optimierung der Wärmeerzeugung lässt zum heutigen Zeitpunkt noch einige Fragen offen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit noch nicht beantwortet werden können. Die externe Studie sollte zu aller erst die Machbarkeit des Fernwärmeanschlusses klären. Dann wären die finanziellen Konditionen für die Fernwärmelieferung zu verhandeln.

Die Wärmepumpenlösung müsste im Rahmen einer Variantenstudie vertieft werden. Ein Pumpversuch an den Grundwasserfassungen müsste auch Aufschluss über die mengenmässige Ergiebigkeit geben. Die Heizungsanlagen der Eternit müssten zuerst mittels Betriebsoptimierung "tauglich" für eine Wärmepumpe gemacht werden.

Mit diesen Grundlagen können dann die langfristigen, dynamisch gerechneten Wärmegestehungspreise für die Fernwärme und die Wärmepumpe verglichen werden.

Würde die Wärmeerzeugung mittels Fernwärme oder Grundwasser-Wärmepumpe ergänzt, könnten die 15% Energieeinsparung bei den Gebäuden auf 25-30% bzw. 1'700-2'000 MWh/a erhöht werden.

Die Analyse der thermischen Prozessanlagen hat ebenfalls Potenzial zur Energieeinsparung aufgezeigt. Insbesondere die Wärmerückgewinnung der Trocknerabluft, d.h. Vorwärmung der Zuluft mittels Abluft, würde eine erhebliche Wärmerückgewinnung (WRG) ermöglichen.

Die Pinch-Analyse hat ausserdem aufgezeigt, dass insbesondere die alten Prozessanlagen thermische Verluste von bis zu 25% aufweisen. Bezogen auf den Energiebedarf von 3.6 GWh/a sind dies 900 MWh/a. Einige Anlagen sind alt und haben die technische Lebensdauer überschritten. Eine Optimierung würde sich aus finanzieller und technischer Sicht nicht lohnen. Die einzig verbleibende Möglichkeit diese Verluste einzudämmen besteht oft darin, die Anlagen konsequent vom Netz zu nehmen und die Produktion auf andere Maschinen zu verlagern.

Eternit in Niederurnen plant mittelfristig das heutige Areal auf die andere Seite der Bahngeleise auszuweiten. Die Optimierung der Heizungsanlagen und der alten Prozessanlagen müssen sehr stark auch in diesem Kontext geplant und mit den Entscheidungsträgern der Firma besprochen werden. Es ist weiter zu beachten, dass auch Massnahmen mit einem statischen Payback grösser vier Jahre, dynamisch gerechnet, sehr wirtschaftlich sein können und somit nicht einfach ausser Acht gelassen werden sollten.

Die vorliegende Pinch-Analyse wurde vom Bundesamt für Energie finanziell unterstützt. An dieser Stelle möchten wir diese Unterstützung verdanken.

1. Ausgangslage

1.1 Allgemein

Die Eternit (Schweiz) AG stellt in Niederurnen (im folgenden Eternit genannt) hochwertige Produkte aus Faserzement her. Die Produktion auf dem Werkplatz Niederurnen konzentriert sich hauptsächlich auf Fassaden- und Dachelemente sowie Platten für Innenanwendungen.

Eternit will sich rückwirkend per 1. Januar 2013 von der CO_2-Abgabe befreien lassen. Sie muss hierfür dem Bund einen Zielvorschlag mit einem individuell festgelegten Emissionsziel vorlegen. Als Teil des Zielvorschlages muss der Ist-Zustand der technischen Anlagen beschrieben werden. Eternit ist Teilnehmerin der Gruppe "Exoten" im Energie-Modell der EnAW.

Eternit ist über Jahrzehnte gewachsen. Dies zeigt sich besonders bei den Produktionsanlagen. Diese sind zum Teil in gutem Zustand, zum Beispiel die Trocknungsanlage TA08, und entsprechend gut dokumentiert. Andere Anlagen, wie die Beschichtungsanlage BA-GF (Swisspearl), sind hingegen mehrere Jahrzehnte alt und verfügen über praktisch keine Unterlagen zu den thermischen Prozessen. Die Erarbeitung der Grundlagen und einer energetischen Übersicht der verschiedenen Anlagen war daher aufwändig. Grösstenteils mussten zuerst Prinzipschemata erstellt werden. Zudem ist das Areal mit seiner Fläche von 84'000 m^2 sehr gross. Die thermischen Prozessanlagen sind weit verstreut.

Die Anlagen werden mehrheitlich im Zweischichtbetrieb betrieben. Dabei können die Produkte, d.h. Durchsatz und Abmessungen, stark variieren. Die Produktion kann je nach Konjunktur und Jahreszeit starke Schwankungen aufweisen.

Um die thermischen Prozesse und die technischen Gebäudeanlagen in ihrer Komplexität und als System zu erfassen, wurde mit einer Pinch-Analyse gearbeitet.

Der vorliegende Bericht zeigt die Resultate und Empfehlungen der Pinch-Analyse. In einem separaten Bericht wird der Zustand der wichtigsten technischen Einrichtungen beschrieben und bewertet. Beide Berichte sollen Eternit helfen, die notwendigen Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu erkennen und deren Umsetzung einzuleiten.

1.2 Energiesituation

Das Werk hat einen sehr grossen fossilen Energieverbrauch in Form von Erdgas und Heizöl. Im Jahr 2012 wurden rund 12.5 GWh Energie für Heizung und thermische Prozesse benötigt. Abbildung 1 zeigt den Energiefluss als Energiefluss-Diagramm. Es fällt auf, dass für die Heizung der Gebäude ein grosser Teil der thermischen Energie aufgewendet wird. Im Jahr 2012 waren dies 6.9 GWh bzw. 55% der gesamten fossilen Energie. Die restlichen 5.6 GWh im Jahr 2012 benötigten die Prozessanlagen, insbesondere die Trocknungs- und Beschichtungsanlage Swisspearl, sowie der Trockner TA-08. Der Heizölbedarf beträgt etwa 15% der fossilen Energie.

Zur fossilen Energie kommt ein Strombedarf von rund 9.5 GWh. Dieser fällt zu einem grossen Teil bei der Produktion der Faserzement-Elemente an. Im Jahr 2012 benötigte die Produktion (inklusive Druckluftanlagen) rund 7.4 GWh bzw. 80% der elektrischen Energie.

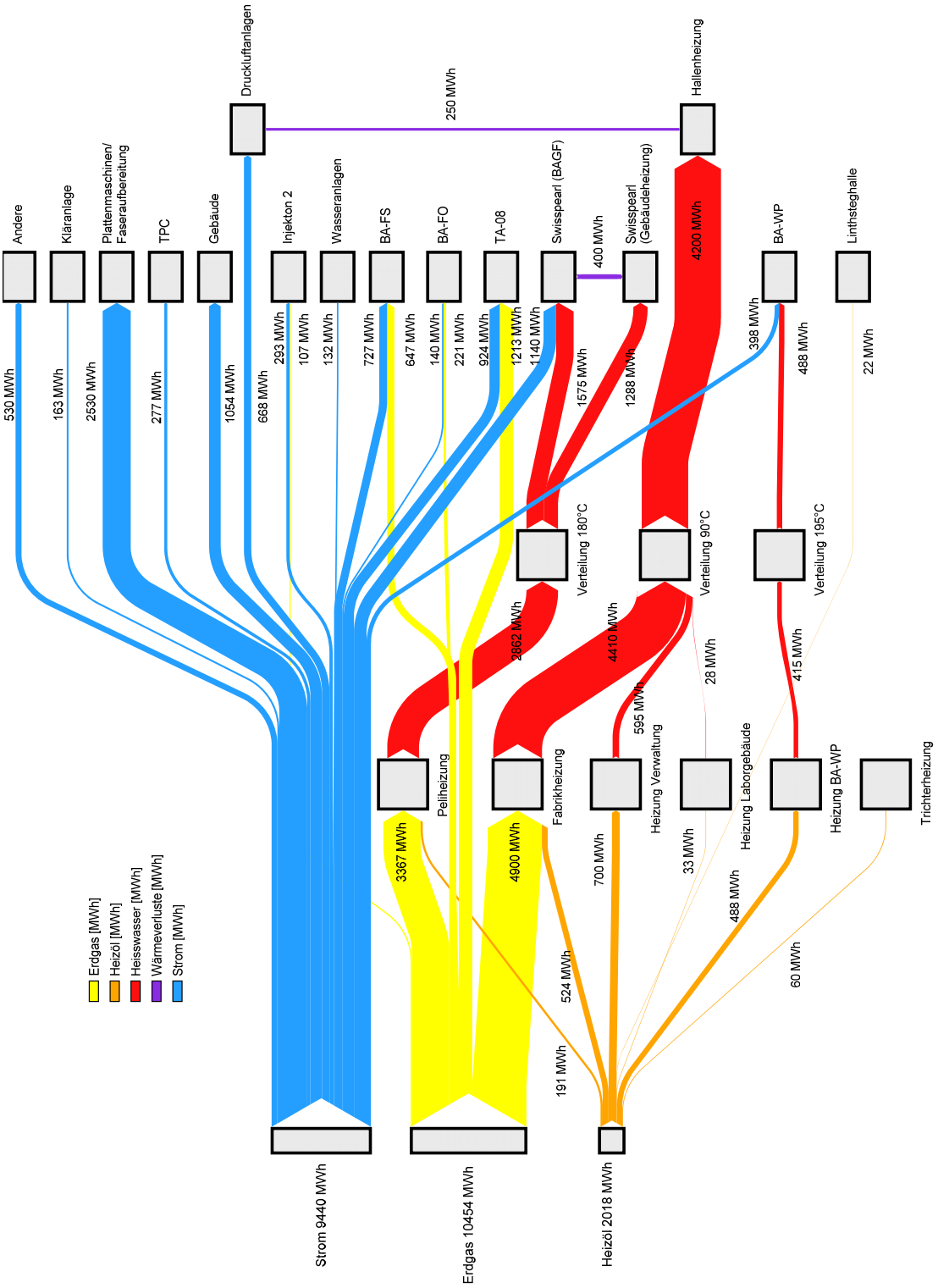


Abbildung 1: Energiefluss-Diagramm ganzes Werk

Die thermischen Prozessanlagen laufen autonom, meistens im Zweischichtbetrieb, im Durchschnitt mit 4'000 h Betriebszeit pro Jahr.

Ein Teil der benötigten thermischen Energie für die Prozesse wird mittels Infrarot-Wärmestrahler (IR-Ofen) bereitgestellt. Die gesamthaft installierte Leistung der IR-Ofen beläuft sich auf 183 kW. Bei 4'000 Betriebsstunden und einer Auslastung von rund 60% beläuft sich der Energiebedarf der Infrarot-Wärmestrahler auf 439 MWh/a oder ca. 8% der thermischen Prozessenergie. Die Infrarot-Wärmestrahler wurden zum Teil nachträglich in die Anlagen eingebaut, da die bestehende Infrastruktur die Produktionskapazität nicht mehr decken konnte.

Die fossilen Energieerzeuger lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- Zweistoffbrenner Gas und Öl
  - Swisspearl
  - Fabrikheizung
- Direktbefeuerte Gasbrenner
  - TA-08
  - BA-FS
  - BA-FO
  - Injektion
- Ölbrenner
  - BA-WP
  - Trichterheizung Plafa
  - Linthsteghalle
  - Mobile Heizungen
  - Verwaltung
  - Labor

Die Anlagen sind in verschiedenen Gebäuden untergebracht (vgl. Arealplan im Anhang A.1). Die energieintensivsten, thermischen Prozesse befinden sich in den Gebäuden 310 (Swisspearl), 390 (TA-08), 230 (BA-FS), 210 (BA-WP), 280 (BA-FO) und 270 (Injektion).

Die Pinch-Analyse ist auf diese Prozessanlagen fokussiert. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die betrachteten Anlagen.

Das Gelände ist sehr weitläufig. Wie im Arealplan (vgl. Anhang A.1) gut erkennbar ist, sind auch die Prozessanlagen weit voneinander entfernt. Aus diesem Grund werden diese autonom betrachtet, d.h. die Wärmeströme der einzelnen Anlagen werden für die Pinch-Analyse nicht gemeinsam, d.h. prozessübergreifend, betrachtet.

Die Installation einer prozessübergreifenden Wärmerückgewinnung (WRG) ist bei breit gestreuten Anlagen wirtschaftlich nicht machbar - so auch hier.

Anlage	Typ	Medium	Energiebedarf 2012 [MWh/a]	Betriebszeit [h]
Swisspearl	Beschichtungsanlage und Hallenheizung	Heisswasser 180°C/IR-Ofen	3'558	4'000
TA-08	Trockner	Direktbefeuert mit Erdgas	1'213	4'000
BA-FS	Beschichtungsanlage	Direktbefeuert mit Erdgas	647	4'000
BA-WP	Beschichtungsanlage	Thermoöl/IR-Ofen	488	4'000
BA-FO	Beschichtungsanlage	Direktbefeuert mit Erdgas	221	4'000
Injektion	Beschichtungsanlage	Direktbefeuert mit Erdgas	107	4'000

Tabelle 1: Untersuchte thermische Prozessanlagen

2. Pinch-Analyse

Die Pinch-Analyse ist eine vom Bund anerkannte Methode zur Optimierung von energieintensiven, thermischen Prozessen. Sie unterscheidet sich von herkömmlichen Analysemethoden in der ganzheitlichen und systematischen Betrachtungsweise.

Für die Pinch-Analyse wird das Tool PinCH, das in Zusammenarbeit von Hochschule Luzern Technik & Architektur (HSLU T&A), dem Bundesamt für Energie (BFE) und der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) entwickelt wurde, eingesetzt.

Die vorliegende Pinch-Analyse wird vom BFE massgebend unterstützt.

2.1 Vorgehen

Schritt 1: Daten ermitteln

Im ersten Schritt der Analyse wurden die wichtigen Daten der thermischen Prozesse ermittelt. Dies sind insbesondere Temperaturen, Massenströme und Leistungen.

Diese mussten in Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal zuerst ermittelt werden (zum Teil mit Messungen vor Ort).

Schritt 2: Thermische Ströme definieren

Bei Eternit sind die thermischen Prozesse immer mit dem Heizen oder Kühlen von Faserzementplatten verbunden. Da die Platten einen festen Stoff darstellen und kein Medium wie Wasser oder Luft, ist die Definition der Ströme für die Pinch-Analyse nicht trivial und mit Restriktionen verbunden. Ein Plattentrockner unterscheidet dabei folgende heissen und kalten Ströme:

- Zuluft (Brenner und Feuerraum) aufheizen (kalter Strom)
- Platten aufheizen (kalter Strom)
- Wasser in den Platten aufheizen (kalter Strom)
- Wasser in den Platten verdampfen (kalter Strom)
- Abluft kühlen (optionaler heisser Strom, d.h. keine Prozessanforderung)
- Platten kühlen (heisser Strom)
- Wasser in den Platten kühlen (heisser Strom)

Die vollständige Stromtabelle aller Anlagen befindet sich im Anhang A.3.

Schritt 3: Verbundkurve

Aus den definierten Strömen wird in Schritt drei der Analyse die so genannte Verbundkurve ermittelt. Dazu werden die vorgängig definierten heissen und kalten Ströme zu einer Temperatur-Enthalpie-Kurve zusammengesetzt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Verbundkurve des Trockners TA-08 für den Winterfall.

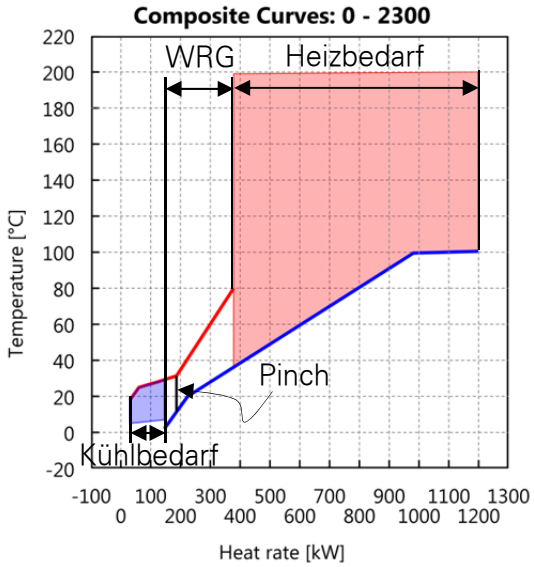


Abbildung 2: Verbundkurve Trockner TA-08, Winter, Pinch = 21.4 °C, ΔT = 20 K

Im besten Fall, wenn die Anlage vollständig optimiert wäre, würde der Heizbedarf 820 kW, der Kühlbedarf 116 kW und das WRG-Potential 232 kW betragen. Das Optimierungspotential bezogen auf den Fall ohne WRG beträgt somit 22%.

Dort wo sich die zwei Kurven am nächsten kommen spricht man vom "Pinch" (schwarze senkrechte Linie). Pinch kommt aus dem englischen und kann als "Einschnürung" übersetzt werden. Der Pinch repräsentiert die minimale Temperaturdifferenz, die zur Wärmeübertragung notwendig ist (diese hängt stark von der Fläche, der Bauart und dem Medium der Wärmeübertrager ab). Zudem teilt der Pinch die Verbundkurve in zwei thermodynamische Systeme: Eine Wärmequelle unter dem Pinch bzw. Wärmesenke über dem Pinch.

Schritt 4: Wärmeübertrager-Netzwerk

Im letzten Schritt der Pinch-Analyse werden systematisch die Wärmeübertrager ermittelt, die das WRG-Potential erreichen können. Da der Pinch das Energiesystem in eine Wärmequelle und -senke teilt, gibt es dazu klare Regeln. Die Kosten bzw. Einsparung an Betriebsenergie lassen dann auf den Payback der WRG-Massnahmen schliessen.

2.2 Konzept

2.2.1 Allgemein

Für die wirtschaftliche Bewertung der energetischen Massnahmen wurden in der ganzen Studie die Energiepreise verwendet, die im Rahmen des Energie-Modells der EnAW für Eternit angewendet werden. Der Strompreis beträgt demzufolge 14 Rp./kWh und der Gaspreis 10 Rp./kWh. Der Kühlenergie-Preis für eine kWh abgeführte Wärme via Grundwasser wird mit geschätzten 2 Rp./kWh eingesetzt.

Für die Frage, welche Massnahmen in das Ziel des Zielvorschlags mit einem individuell festgelegten Emissionsziel einbezogen werden sollten, wird die Wirtschaftlichkeitsschwelle gemäss den Vorgaben des Bundes verwendet. Massnahmen mit einem statischen Payback von vier Jahren für Prozessanlagen und acht Jahren für Gebäude und Infrastruktur gelten als wirtschaftlich und sollten in das Ziel einbezogen werden. Es ist aber deutlich festzuhalten, dass auch Massnahmen mit einem schlechteren statischen Payback, dynamisch gerechnet, betriebswirtschaftlich sehr interessant sein können. Solche Massnahmen sind also immer auch im Auge zu behalten. Grosse Massnahmen sollten vor dem Umsetzungsentscheid immer auch dynamisch gerechnet werden (zum Beispiel mit der Barwert-Methode).

2.2.2 Beschichtungsanlage Swisspearl (BA-GF)

Energiesituation

Die Swisspearl wird mit einem Heisswassernetz (Vorlauftemperatur 180°C) bewirtschaftet. Die bekannten Energieverbrauchsdaten der Anlage beziehen sich immer auf die komplette Halle, d.h. die Beschichtungsanlage und die Heizung des Gebäudes. Für die Analyse wurde folgende Aufteilung des Energieverbrauchs ermittelt:

- Gebäudeheizung 45% (1'601 MWh im Jahr 2012)
- Beschichtungsanlage Swisspearl 55% (1'957 MWh im Jahr 2012), wobei ca. 20% der Energie in den Raum abstrahlt.

Wird der Energieverbrauch über die letzten 7 Jahre gemittelt, ergibt dies für die Gebäudeheizung eine Leistung von ca. 700 kW (inkl. 20% Abstrahlung) und für die Beschichtungsanlage ca. 540 kW.

Der Energieverbrauch von 1'957 MWh im Jahr 2012 entspricht rund 35% der gesamten Prozessenergie auf dem Werkplatz.

Der Wärmeerzeuger der Swisspearl, ein Dampfkessel mit Heisswasser-Umformer, musste im 7-Jahres Schnitt eine Gesamtleistung von rund 1.2 MW an Heisswasser liefern.

Pinch-Analyse

Für die Pinch-Analyse der Swisspearl wurden ein Winter- und Sommerfall unterschieden. Dies ist notwendig, da die Anlage Frischluft vom Dach des Gebäudes ansaugt. Im Winter wird eine durchschnittliche Aussentemperatur von 0°C und im Sommer von 20°C angenommen. Abbildung 3 zeigt die Verbundkurven für den Winter- und Sommerfall. In Abbildung 4 ist zudem die Kostenkurve für die Ermittlung der optimalen Temperaturdifferenz aufgezeigt. Der Kostenkurve ist ein so genanntes Kreislaufverbundsystem (KVS) hinterlegt. Es zeigt sich, dass bei solchen Systemen eine grosse Bandbreite für nahezu optimale Temperaturdifferenzen existiert. Das ΔT_{min}, die minimale Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung, sollte bei einem KVS jedoch 15°C nicht unterschreiten. Dies gilt für

die Kosten, aber auch die technische Machbarkeit des Systems. Auf Grund von Herstellerunterlagen wurde das minimale ΔT_{min} für KVS auf 20°C gesetzt.

Die Heizleistung ohne WRG beträgt nur für die Platten (ohne Abstrahlung) 360 kW im Winter bzw. 350 kW im Sommer. Bei einem Energieverbrauch von 3'558 MWh (4'000 h) im Jahr 2012 ist die Verlustenergie der Anlage, bei anteilsmässig 55% für die Swisspearl, ca. 25%.

Die maximal mögliche WRG ist mit 85 kW im Winter und 75 kW im Sommer gegeben. Das WRG-Potential bezogen auf die Energie für das Produkt beträgt 24% im Winter und 20% im Sommer.

Für den Fall, dass die Verluste der Anlage eliminiert und zusätzlich eine WRG eingebaut werden könnte, beträgt das Einsparpotential 56%.

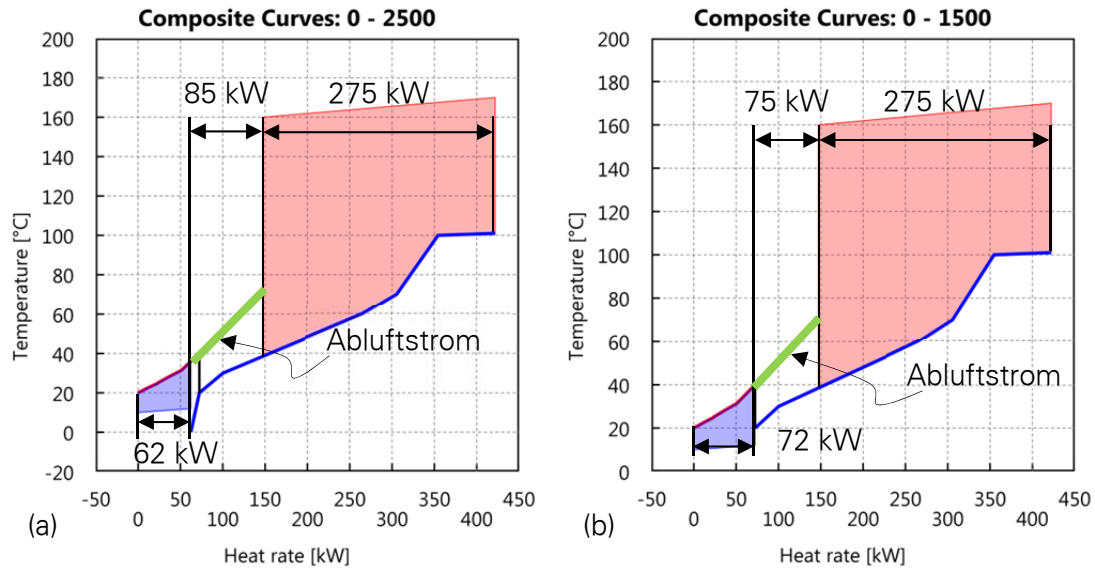


Abbildung 3: Swisspearl, Verbundkurve Winter (a) und Sommer (b), ΔT_{min} = 20 K

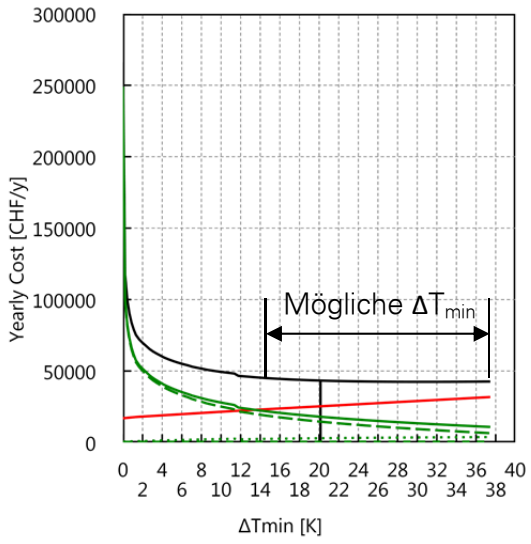


Abbildung 4: Evaluierung ΔT_{min} für ein typisches KVS

Die "Plattenströme" können nicht direkt als WRG genutzt werden, da sie kein Medium wie z.B. Luft oder Wasser darstellen. Bei den Trocknungsanlagen muss die WRG über die Zu- und Abluftströme stattfinden. Dies kann mit einem so genannten KVS erreicht werden. Abbildung 5 zeigt das entsprechende Prinzipschema.

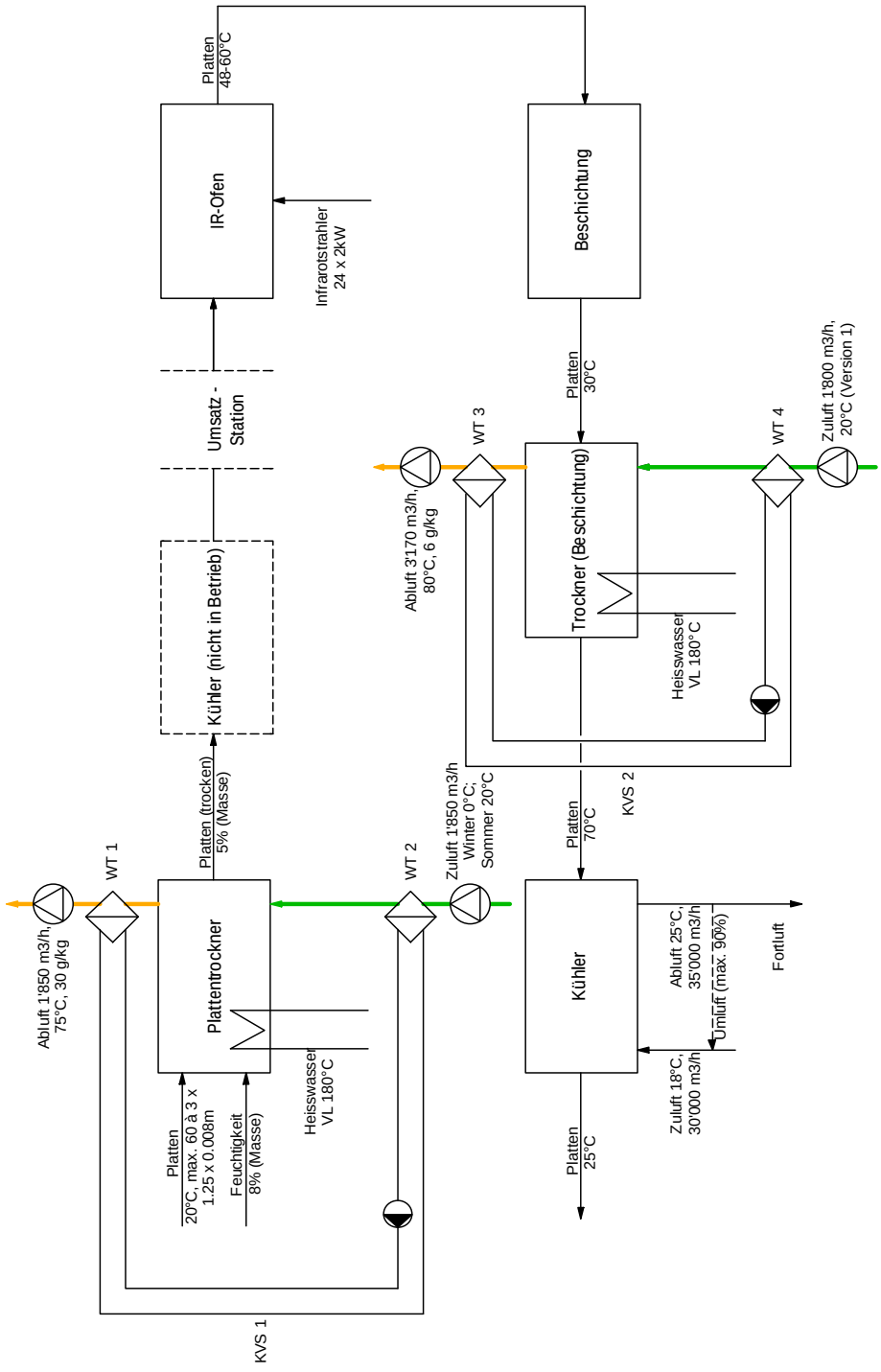


Abbildung 5: Prinzipschema BA-GF mit KVS 1 und KVS 2

Die berechneten Daten für die KVS sind in Tabelle 2 aufgeführt.

KVS	Abluft/Zuluft [m³/h]	t_{11} [°C]	t_{12} [°C)	t_{21} [°C]	t_{22} [°C]	Q_{WRG} [kW]	ΔT_{LM} [K]	Effizienz [%]
KVS 1 Winter	1'850/1'850	0	56	75	26	35	22	75
KVS 1 Sommer	1'850/1'850	20	53	75	36	20	20	60
KVS 2 Winter	1'800/3'150	0	60	75	30	36	22	80
KVS 2 Sommer	1'800/3'150	20	61	75	47	25	20	75

Tabelle 2: Daten KVS 1 und 2, Swisspearl (BA-GF)

Die Pinch-Analyse hat weiter gezeigt, dass die Verluste der Anlage mit 20-25% sehr hoch sind. Der Grund dafür ist im Alter der Anlage zu suchen. Sie ist am Ende der technischen Lebensdauer. Neuere Anlage wie die TA-08 sind wärmetechnisch viel besser aufgebaut bzw. besser isoliert. Die Halle der TA-08 weisst aus diesem Grund deutlich tiefere Raumtemperaturen auf. Der Plattentrockner BA-GF sollte daher kurz- bis mittelfristig vom Netz genommen werden. Eine Energieeinsparung von rund 250 MWh/a wäre die Folge.

2.2.3 Trocknungsofen TA-08

Energiesituation

Der Trocknungsofen TA-08 benötigte im Jahr 2012 1'213 MWh Wärmeenergie. Dies sind rund 22% der thermischen Prozessenergie. Gemäss Angaben von Eternit kann die Anlage im Jahresschnitt mit 600-700 kW Heizleistung gefahren werden. Neben einem grossen Teil Umluftbetrieb im Ofen ist eine WRG mit einer maximalen Leistung von 320 kW installiert. Gemäss Auslegung wird mit einer Einsparung im Winter bei 2°C von 206 kW und 225 kW im Sommer bei 20°C gerechnet. In Tabelle 3 sind zwei effektive Betriebszustände der Anlage im Oktober 2013 und Januar 2014 aufgeführt. Beide Betriebszustände weisen eine Effizienz von über 75% auf.

TA-08	Abluft/Zuluft [m³/h]	t_{11} [°C]	t_{12} [°C]	t_{21} [°C]	t_{22} [°C]	Q_{WRG} [kW]	ΔT_{LM} [K]	Effizienz [%]
02.10.2014	15'850/13'000	17.9	69.5	79.1	53.1	215	20	80
06.01.2014	15'000/13'000	8.3	62.8	79.7	41.6	235	25	76

Tabelle 3: Daten KVS TA-08

Pinch-Analyse

Die Pinch-Analyse zeigt für den Winterfall einen optimalen Heizbedarf von 502 kW und 487 kW für den Sommerfall. Die Verbundkurven sind in Abbildung 6 aufgezeigt. Es ist zu beachten, dass der Heiz- und Kühlbedarf je nach Plattendurchsatz, der wiederum von der Nachfrage auf dem Markt abhängig ist, stark schwanken kann. Die optimale WRG entspricht 377 kW im Winter- und 464 kW im Sommerfall.

Die Trocknungsanlage ist wiederum auf die Zu- und Abluftströme für die WRG beschränkt. Die Pinch-Analyse zeigt für den Winterfall eine WRG-Leistung von 240 kW. Die Zuluft kann dabei von 0°C auf 55°C erwärmt werden. Vergleicht man den Wert der Pinch-Analyse mit den effektiven Betriebszuständen zeigt sich für die bestehende Anlage eine

gute Effizienz. Bei einer durchschnittlichen WRG-Leistung von 220 kW und Betriebszeit von 4'000 h ergibt sich eine Energiemenge von 880 MWh/a. Dies entspricht 72% vom Energiebedarf im Jahr 2012.

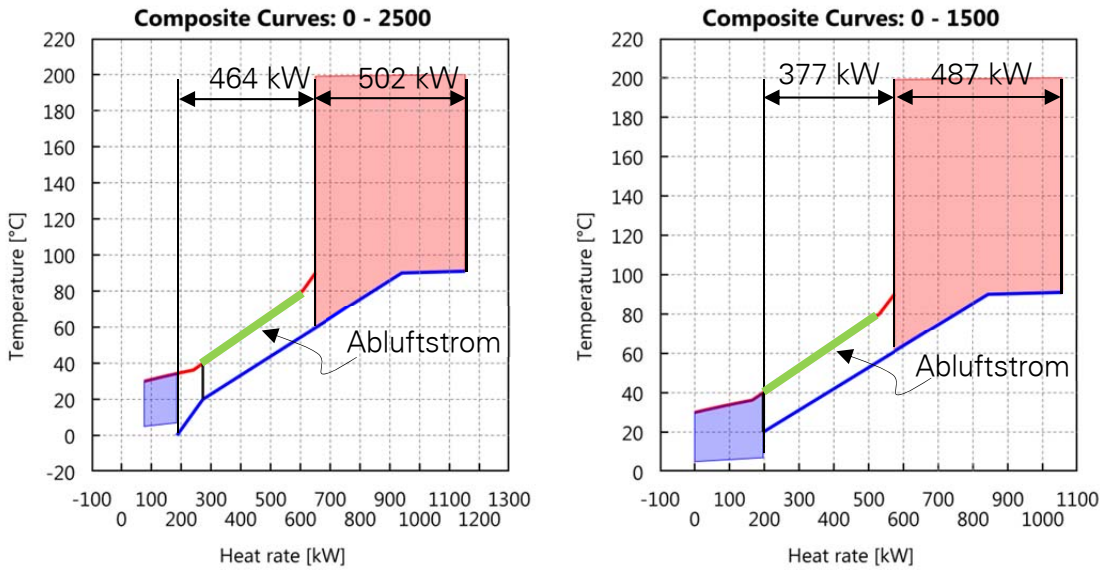


Abbildung 6: Umlufttrockner TA-08, Verbundkurve Winter (a) und Sommer (b), ΔT_{min} = 20 K

2.2.4 Beschichtungsanlage BA-FS

Energiesituation

Die Anlage BA-FS ist direkt mit Gasbrennern befeuert. Sie benötigte im Jahr 2012 647 MWh thermische Energie oder rund 12% der thermischen Prozessenergie. Die BA-FS ist eine reine Beschichtungsanlage, d.h. sie trocknet nur die Beschichtung der Platten, nicht aber die Platten selbst. Die installierte Leistung beträgt 4 x 232 kW oder 928 kW.

Die BA-FS beschichtete im Jahr 2012 während rund 4'000 h. Beim Energieverbrauch der Anlage fällt auf, dass dieser extremen monatlichen Schwankungen unterliegt. Im August verbrauchte die Anlage rund 7'000 m^3 Erdgas und im Oktober hingegen 3'800 m^3, also gut die Hälfte. Der Grund dafür ist in der Produktionsmenge der Faserzementplatten zu suchen.

Pinch-Analyse

Der Energieverbrauch und die Leistung der BA-FS weisen starke Schwankungen auf. Eine genaue Verbundkurve für die Anlage ist schwierig zu ermitteln, da diese, abhängig vom Durchsatz und dem Plattentyp, immer wieder ändert. Zudem ist der Betrieb der einzelnen Trockner abhängig vom Produkt bzw. Giess- oder Spritzverfahren, das angewendet werden muss.

Für die Pinch-Analyse wurden Mittelwerte, d.h. mittlere Plattendurchsätze, ermittelt. Der Plattendurchsatz der Maschine wurde mit 5'000 kg/h eruiert. Es wird davon ausgegangen, dass einer der Trockner immer in Betrieb ist. In Abbildung 7 ist der Betriebsfall abgebildet, in dem Trockner 2 läuft und Trockner 1 nur als Transportstrecke verwendet wird.

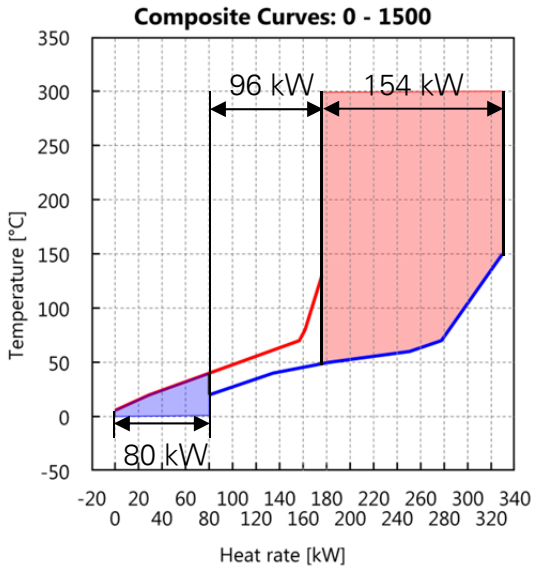


Abbildung 7: Beschichtungsanlage BAFS, Verbundkurve mit Trockner 2 in Betrieb, ΔT_{min} = 20 K

Für diesen Betriebsfall beträgt der optimale Heizbedarf 154 kW und der Kühlbedarf 80 kW. Das WRG-Potential zeigt sich mit 96 kW. Ohne WRG beträgt der Heizbedarf 250 kW. Die WRG entspricht also 38% des Heizbedarfs von 250 kW.

Die BA-FS ist im WRG-Potential ebenfalls limitiert, da lediglich die Zu- und Abluftströme mit Luft als Medium gefahren werden. Die HEN-Analyse hat gezeigt, dass die Wärmeübertrager nicht grösser als 15-20 kW wären. Es kommt erschwerend hinzu, dass die Frischluft für den Trocknungsprozess nicht über Kanäle geführt wird. Ein solches WRG-System zu realisieren, wäre aus technischer und wirtschaftlicher Sicht mit enormem Aufwand verbunden. Aus der WRG würde kein guter Kosten-Nutzen, bzw. Payback resultieren.

2.2.5 Beschichtungsanlage BA-WP

Energiesituation

Im Jahr 2012 wurde für die BA-WP 488 MWh Energie in Form von Heizöl aufgewendet, was 9% der thermischen Prozessenergie entspricht. Die Betriebszeit betrug 4'000 h. Dies entspricht einer durchschnittlichen Leistung von 122 kW. Die BA-WP verfügt zudem über einen IR-Ofen mit 135 kW Anschlussleistung. Dieser ist, je nach Bedarf, prozentual geregelt (im Sommer ca. 55%, im Winter ca. 80%).

Als Wärmeträger-Medium wird für die BA-WP Thermoöl mit einer Vorlauftemperatur von 195°C verwendet. Das Kühlmedium wird in Form von Luft direkt über dem Bach neben der Halle angesaugt. Luft oberhalb des Baches hat ganzjährig eine Temperatur zwischen 5°C bis 10°C.

Die Beschichtungsanlage saugt die Zuluft für die Trockner direkt aus dem Raum an. Dabei wird der Raum abgekühlt. Es ist jedoch zu beachten, dass durch Abstrahlung viel zusätzliche Wärme in den Raum gelangt. Die Raumlufttemperatur ist für die Behaglichkeit der Mitarbeitenden eher zu hoch.

Pinch-Analyse

Die Verbundkurve für die BA-WP ist in Abbildung 8 abgebildet. Für die BA-WP werden zwei Fälle abgebildet. Die Ist-Situation, d.h. die Zuluft wird aus dem Raum angesaugt und der Fall, der Luft über das Dach ansaugt.

Der optimale Energiebedarf für die Ist-Situation beläuft sich auf 53 kW Heiz- und 13 kW Kühlenergie. Entsprechend besteht ein theoretisches WRG-Potential von 97 kW bzw. 65%. Das WRG-Potential für den Fall, wo Luft über das Dach ansaugt wird, liegt noch etwas höher bei 110 kW.

Ohne WRG, was die Ist-Situation abbildet, benötigt die Anlage 150 kW Heizenergie, wovon 92 kW fossil und 58 kW elektrisch sind.

Gemäss Energieverbrauch und Betriebszeit benötigte die BA-WP im Jahr 2012 ca. 122 kW fossile Heizenergie. Die Differenz zwischen effektivem Bedarf und dem Pinch-Analyse-Modell lässt darauf schliessen, dass ca. 30 kW bzw. 25% der Energie als Verluste anfallen.

Im aktuellen Zustand der Anlage wird die Abluft des Trockners für die Abdunststrecke genutzt. Dabei wird heisse Abluft (ca. 70°C) mit Raumluft (ca. 30°C) gemischt und durch die Abdunststrecke gesogen. Hier muss kritisch hinterfragt werden, ob die Abdunstung effektiv mit 70°C heisser Luft bewirtschaftet werden muss. In Tabelle 4 sind die KVS für den Winter- und Sommerfall aufgeführt. Abbildung 9 zeigt das Prinzipschema der KVS.

KVS	**Abluft/Zuluft [m^3/h]**	**t_{11} [°C]**	**t_{12} [°C]**	**t_{21} [°C]**	**t_{22} [°C]**	**Q_{WRG} [kW]**	**ΔT_{LM} [K]**	**Effizienz [%]**
KVS 1 Winter	1'200/1'200	0	65	100	10	27	19	68
KVS 1 Sommer	1'200/1'200	20	72	100	33	20	19	65
KVS 2 Winter	950/2'300	0	56	70	41	18	25	75
KVS 2 Sommer	950/2'300	20	58	70	52	11	20	75

Tabelle 4: Daten KVS

Das WRG-Potential der KVS 1 und KVS 2 BA-WP im Winterfall beläuft sich somit auf 45 kW.

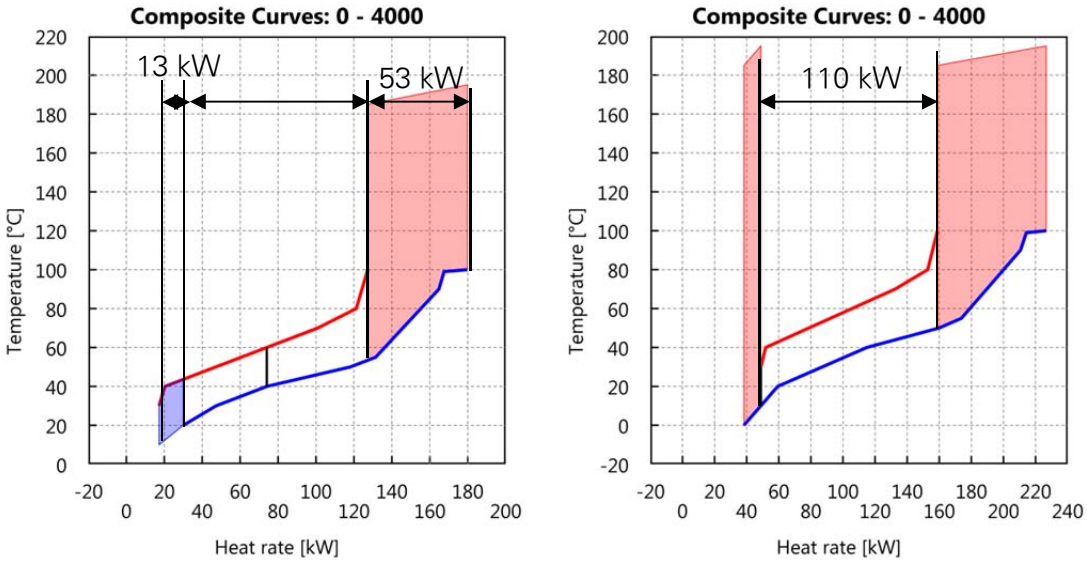


Abbildung 8: Beschichtungsanlage BA-WP, Verbundkurve Sommer (a) und Winter (b), ΔT_{min} = 20 K

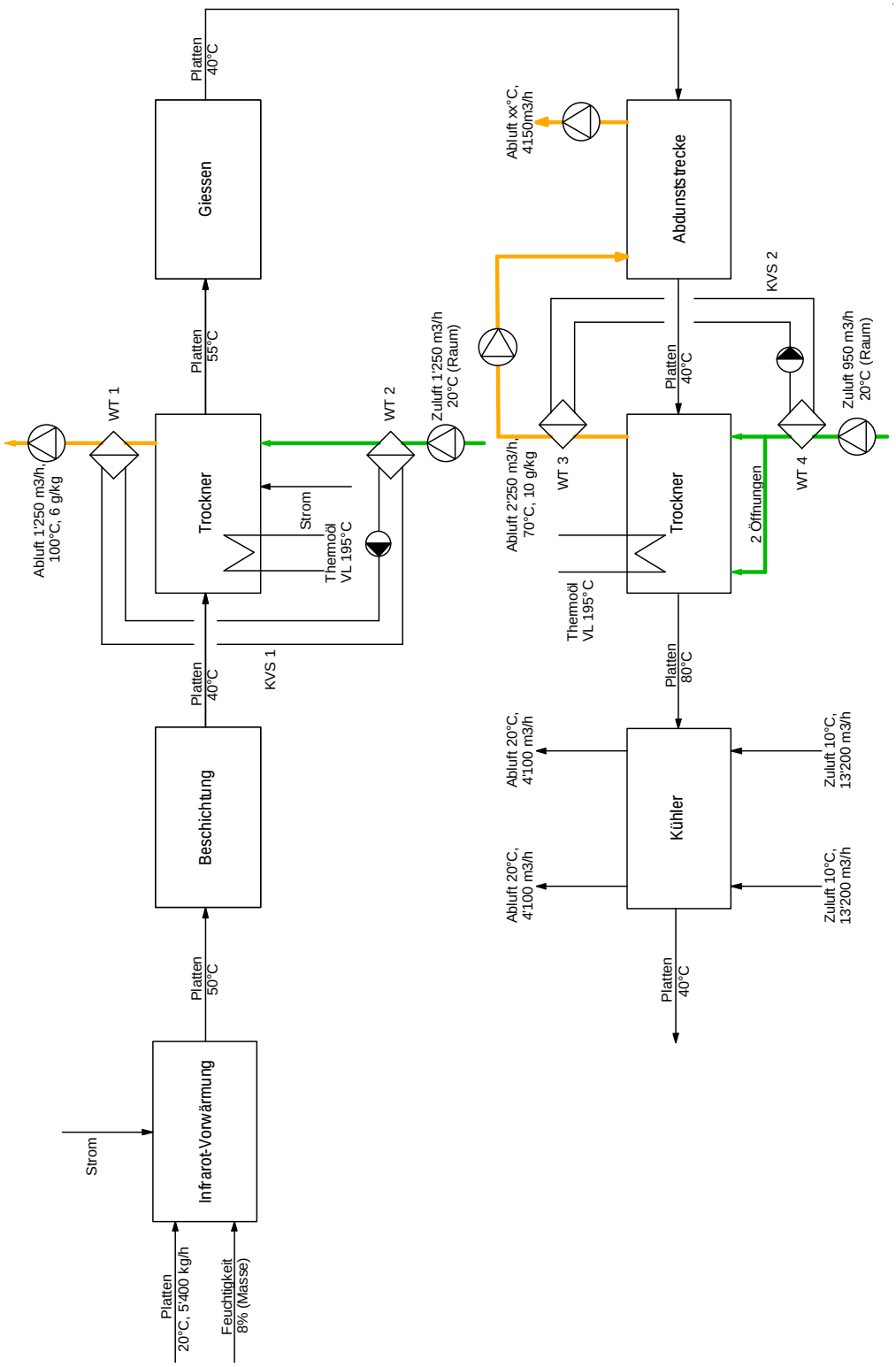


Abbildung 9: Prinzipschema BA-WP mit KVS 1 & KVS 2

2.2.6 Beschichtungsanlage BA-FO

Energiesituation

Die BA-FO benötigte im Jahr 2012 221 MWh oder etwa 4% der thermischen Prozessenergie. Bei 4'000 Betriebsstunden liegt die durchschnittliche Heizleistung bei etwa 55 kW.

Pinch-Analyse

Die Verbundkurve der BA-FO (Abbildung 10) zeigt einen optimalen Heizenergiebedarf von 16 kW und einen Kühlbedarf von 26 kW. Das WRG-Potential wird mit 37 kW bzw. 59% angezeigt. Ohne WRG, also die Ist-Situation, benötigt die Verbundkurve 63 kW.

Die Analyse zeigt die Ist-Situation mit 8% mehr Leistung als der Durchschnitt für das Jahr 2012 von 55 kW. Dies kann durch Schwankungen im Produktionsprozess erklärt werden. Die 55 kW entsprechen einem Schnitt über das Jahr.

Die WRG-Massnahmen sind wiederum auf die Zu- und Abluftströme beschränkt. Das WRG-Potential der KVS ist in Summe 12 kW. Bezogen auf die Ist-Situation, 63 kW Heizleistung, sind dies knapp 20%. Es ist jedoch zu beachten, dass die Wärmeübertrager klein sind, d.h. < 10 kW und die Zuluftströme nicht geführt sind. Ein guter Kosten-Nutzen der KVS kann daher ausgeschlossen werden.

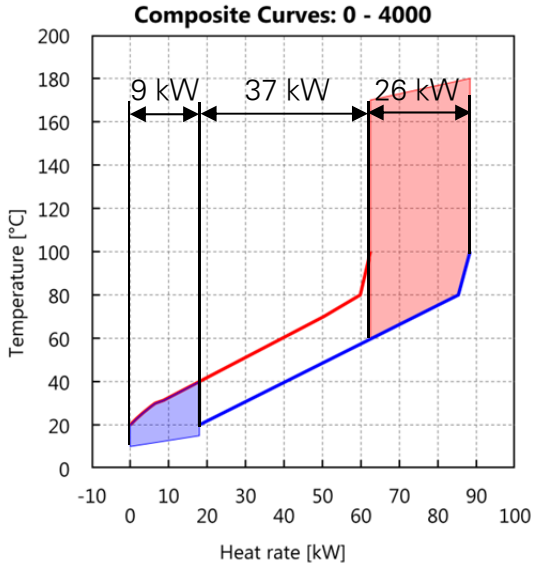


Abbildung 10: Beschichtungsanlage BA-FO, Verbundkurve, ΔT_{min} = 20 K

2.2.7 Beschichtungsanlage Injektion

Energiesituation

Die Injektion benötigte im Jahr 2012 107 MWh Heizenergie oder ca. 2% der Prozessenergie. Umgerechnet mit den Betriebsstunden (ca. 4'000 h) ergibt dies eine durchschnittliche Heizleistung von 27 kW, was bei der Grössenordnung der Prozessanlagen sehr klein ist.

Pinch-Analyse

Für die Pinch-Analyse konnten keine relevanten Daten erhoben werden. Das Potential wird jedoch, da die benötigte Leistung klein ist, als vernachlässigbar eingestuft. Die möglichen Wärmeübertrager wären kleiner als 10 kW.

Bei der Begehung wurde die Abluft der Maschine höchstens als "handwarm" eingestuft. Zudem ist die Zuluft nicht geführt. Eine WRG kann keinen Payback von 4 Jahren erreichen, da der Energiegewinn durch die tiefen Temperaturen und Luftströme viel zu gering wäre.

3. Massnahmen Prozessanlagen

3.1 Abluft-WRG und KVS

Es hat sich gezeigt, dass bei den Trocknungsanlagen das "realisierbare" WRG-Potential bei der Abluft zu suchen ist. Die Abluft hat bei allen Anlagen Temperaturen von 70-120°C. Diese kann genutzt werden, um die notwendige Zuluft (ZUL) vorzuwärmen. Sie muss im Ofen auf typischerweise 100-120°C aufgeheizt werden.

Ein anschauliches Beispiel ist der Plattentrockner TA-08. Mit der eingebauten Abluft-Zuluft-WRG kann die Zuluft das ganze Jahr um mindestens 40°C vorgewärmt werden.

Bei einer Abluft-Zuluft-WRG ist wichtig zu verstehen, dass diese nur realisiert werden kann, wenn die Zuluft "geführt" wird, in Kanälen oder Rohren. Dies ist bei den Anlagen BA-FS, BA-WP (zum Teil) und BA-FO nicht der Fall. Die Luft wird bei diesen Anlagen über den Tunnel des Trockners und den Brenner angesaugt. Ein KVS ist unter diesen Umständen nur sehr schwierig realisierbar. Ein guter Kosten-Nutzen kann daraus nicht resultieren.

Ein gutes Beispiel für eine geführte Zuluft-Abluft-WRG befindet sich bei Eternit (Schweiz) AG in Payerne (vgl. Abbildung 11). Die Zu- und Abluft ist dabei nahe beieinander geführt und kann entsprechend über eine WRG (in diesem Fall kein KVS) geführt werden.

Abbildung 11: Trocknungsofen Eternit(Schweiz) AG, Payerne

3.2 Massnahmen

Die ökonomische Bewertung der Massnahmen ist rein statisch, d.h. es wird kein Zinssatz berücksichtig. Diese Art der wirtschaftlichen Bewertung ist vom Energie-Modell der EnAW resp. den Vorgaben des Bundes für Zielvorschläge vorgegeben. Zudem reicht die Genauigkeit für die erste Einschätzung aus. Es sind nur Massnahmen, die direkt mit den thermischen Prozessen verbunden sind, aufgeführt. Massnahmen zur Gebäudeheizung folgen im nächsten Kapitel.

3.2.1 Swisspearl - Verluste eliminieren

Die Verluste der Swisspearl durch Abstrahlung in den Raum sind mit 20-25% oder 250 MWh/a zu beziffern. Da Eternit über eine neue Trocknungsanlge (TA-08) verfügt, wäre es möglich den Plattentrockner der Swisspearl vom Netz zu nehmen und einen Teil der Verluste zu eliminieren. Die Massnahme wurde mit Eternit intensiv diskutiert. Die neue Trocknungsanlage läuft jedoch noch nicht nach Wunsch, weshalb sie nicht die Kapazität des Plattentrockners der Swisspearl übernehmen kann. Zudem würde die Massnahme folgende Kosten mit sich ziehen:

- Rückbau der Anlage CHF 40'000.-
- Neuer Boden, um die Bodenfläche nutzbar zu machen CHF 20'000.-
- Neue Umlagerungsmaschine zur Beschichtungsanlage CHF 70'000.-
- Zusätzliche Kosten (z.B. Honorare) CHF 20'000.-

Eine weitere Möglichkeit, um die Verluste zu reduzieren, ist die Reduktion der Vorlauftemperatur der Swisspearl. Diese wird heute mit 180°C betrieben. Dazu wird ein Dampfkessel genutzt, der mit Heisswasserumformer ausgerüstet ist. Die Trockner könnten theoretisch auch mit 130°C bewirtschaftet werden, da die Lufttemperatur bei maximal 110°C liegt. Die 180°C werden nur benötigt, um die aktuellen Kapazitäten der Anlage zu bewirtschaften. Diese Massnahme würde jedoch wiederum einen massiven Umbau der Anlage erfordern. Eternit sieht im Moment keine Möglichkeit, die Kapazität der Anlage zu reduzieren, so dass ein Umbau möglich würde.

3.2.2 Swisspearl Zuluft vorwärmen

Für den Plattentrockner und die Beschichtungsanlage sollen je ein KVS erstellt werden. Damit kann die Zuluft für die Trockner vorgewärmt werden. Die Auslegung erfolgt wie in Kapitel 3.2 beschrieben. Mit dem KVS für den Plattentrockner lassen sich 117.5 MWh/a und die Beschichtungsanlage 127.5 MWh/a einsparen.

Für die Beschichtungsanlage wird davon ausgegangen, dass die Zuluft zukünftig über das Dach angesaugt wird. Dies verhindert, dass der Trockner das Gebäude abkühlt bzw. zusätzliche Heizenergie im Gebäude erfordert.

3.2.3 BA-FS Zuluft vorwärmen

Gemäss Pinch-Analyse könnte die Anlage BA-FS ebenfalls mit KVS ausgestattet werden. Damit liessen sich bei zwei Vorwärmern je 60 MWh/a bzw. einem Trockner 34 MWh/a Energie einsparen. Das Problem ist, dass die Zuluft nicht geführt angesaugt wird, d.h. die Luft wird über die Brenner und die Tunnelöffnung angesaugt. Eine technische und wirtschaftliche Machbarkeit mit entsprechendem Payback ist nicht realisierbar.

3.2.4 BA-WP Zuluft vorwärmen

Die BA-WP lässt sich theoretisch mit zwei KVS ausstatten, eines für den Vorwärmer und eines für den Trockner. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, könnte ein KVS beim Vorwärmer 102.5 MWh/a und beim Trockner 60.5 MWh/a Energie einsparen. Die technische Machbarkeit der KVS ist jedoch nicht trivial für die BA-WP. Es ist nur sehr schwierig möglich, die Zu-und Abluftströme zu fassen und über ein gemeinsames System zu führen. Weiter muss abgeklärt werden, ob die Abdunstungsstrecke mit 70°C bewirtschaftet werden muss. Wenn dies der Fall ist, kann der Trockner nicht mit einem KVS ausgestattet werden.

3.2.5 BA-FO Zuluft vorwärmen

Die Pinch-Analyse liefert für die BA-FO zwei mögliche KVS. Die Abluftströme weissen jedoch kleine Volumenströme auf. Zudem sind die Zuluftströme nicht geführt. Die Massnahme kann nicht mit einem guten Kosten-Nutzen realisiert werden und wird daher nicht näher verfolgt.

3.2.6 Wirtschaftlichkeit der Massnahmen

In Tabelle 5 sind die Massnahmen aufgeführt, die aus der Pinch-Analyse resultieren. Die Investitionskosten sind angegeben mit dem Aufwand für die Installationen der Massnahme, sowie externe Kosten für Engineering und interne Kosten von Eternit.

Anlage	**Massnahme**	**Einsparung [MWh/a]**	**Kosten [CHF]**	**Payback [a]**
Swisspearl	Plattentrockner vom Netz nehmen	240	150'000.-	6.5
Swisspearl	Vorlauftemperatur 180°C auf 130°C	9	70'000.-	20
Plattentrockner Swisspearl	Zuluft/Abluft KVS	118	58'000.-	5
Beschichtungstrockner Swisspearl	Zuluft/Abluft KVS	128	73'000.-	5.7
Vorwärmer 1 BA-FS	Zuluft/Abluft KVS	60	45'000.-	7.5
Vorwärmer 2 BA-FS	Zuluft/Abluft KVS	60	45'000.-	7.5
Trockner BA-FS	Zuluft/Abluft KVS	34	45'000.-	13.2
Vorwärmer BA-WP	Zuluft/Abluft KVS	100	53'000.-	5.3
Trockner BA-WP	Zuluft/Abluft KVS	61	48'000.-	8

Tabelle 5: Massnahmenliste der Pinch-Analyse

Es ist zu beachten, dass auch Prozess-Massnahmen mit einem Payback grösser vier Jahre, dynamisch gerechnet, sehr wirtschaftlich sein können und somit nicht einfach ausser Acht gelassen werden sollten.

4. Massnahmen Heizungsanlagen

4.1 Wärmeerzeugung

Die Gebäudeheizung benötigte im Jahr 2012 6.9 GWh der thermischen Energie auf dem Werkplatz (vgl. Abbildung 1). Dies entspricht mehr als der Hälfte des gesamten Energiebedarfs. Dieser Umstand muss in der Energieoptimierung des Werks unbedingt berücksichtigt werden. Die Gebäudeheizung ist der grösste "Hebel", um den Energiebedarf zu reduzieren.

4.1.1 Fernwärme KVA Linthgebiet

In der Nähe der Eternit in Niederurnen, d.h. ca. 3 km Luftlinie entfernt, befindet sich die Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) Linthgebiet. Die Abwärme vom Dampfkreislauf wird heute nur wenig genutzt und hauptsächlich über einen Kühlturm an die Umgebung abgegeben. Mit der Pinch-Analyse der Eternit wurde die Diskussion angestossen, ob Eternit allenfalls mit Fernwärme aus der KVA versorgt werden könnte.

Typische Richtwerte für eine wirtschaftlich interessante Fernwärmetrasse gehen von einem jährlich minimalen Energiebedarf von 2'500 MWh/km_{Trasse} aus. Als grober Richtwert liegt der Wert für Eternit bei 3'300 MWh/km_{Trasse}, was für den Bau einer Fernwärmetrasse sprechen würde. Entsprechende Abklärungen sind bereits im Gange. Eine von der KVA Linthgebiet und dem Kanton Glarus in Auftrag gegebene Studie soll bis im Sommer 2014 Antworten zur Machbarkeit liefern. Fragen zu Medium (Dampf oder Heisswasser), Länge, Investition, Temperatur und zusätzlichen Abnehmern gilt es zu klären. Entscheidend für einen möglichen Anschluss werden dann natürlich vor allem die Konditionen der Wärmelieferung sein.

Mit dem Bau einer Fernwärmetrasse, die allen Temperaturanforderungen der Eternit gerecht wird, könnten die Verluste in den Energiezentralen (Stillstands- und Abgasverluste) um rund 10% oder 690 MWh/a der heute eingesetzten Energie reduziert werden. Erste Abklärungen mit der KVA Linthgebiet haben ergeben, dass wahrscheinlich nicht alle Temperaturniveaus mit der Fernwärme abgedeckt werden können. So wäre für die 180°C Betriebstemperatur der BA-GF und 195°C der BA-WP eine Dampfleitung mit ca. 230°C notwendig. Für die Abschätzung der Massnahme wird daher von einer Fernwärmetrasse mit 130°C Heisswasser ausgegangen. Die Energieeinsparung wird daher konservativ mit 5% bzw. mindestens 300 MWh/a angenommen.

4.1.2 Grundwasser-Wärmepumpe

Auf dem Areal der Eternit befinden sich zwei Grundwasserbrunnen mit einer maximalen Kapazität von 2 x 80 m^3/h. Diese werden hauptsächlich zur Rückkühlung der Prozessanlagen verwendet. Das Grundwasser wird über die Plattenkühler und Steuerräume gepumpt und kommt im Jahresschnitt mit 15-17 °C zurück zum Sickerbrunnen (vgl. Abbildung 12).

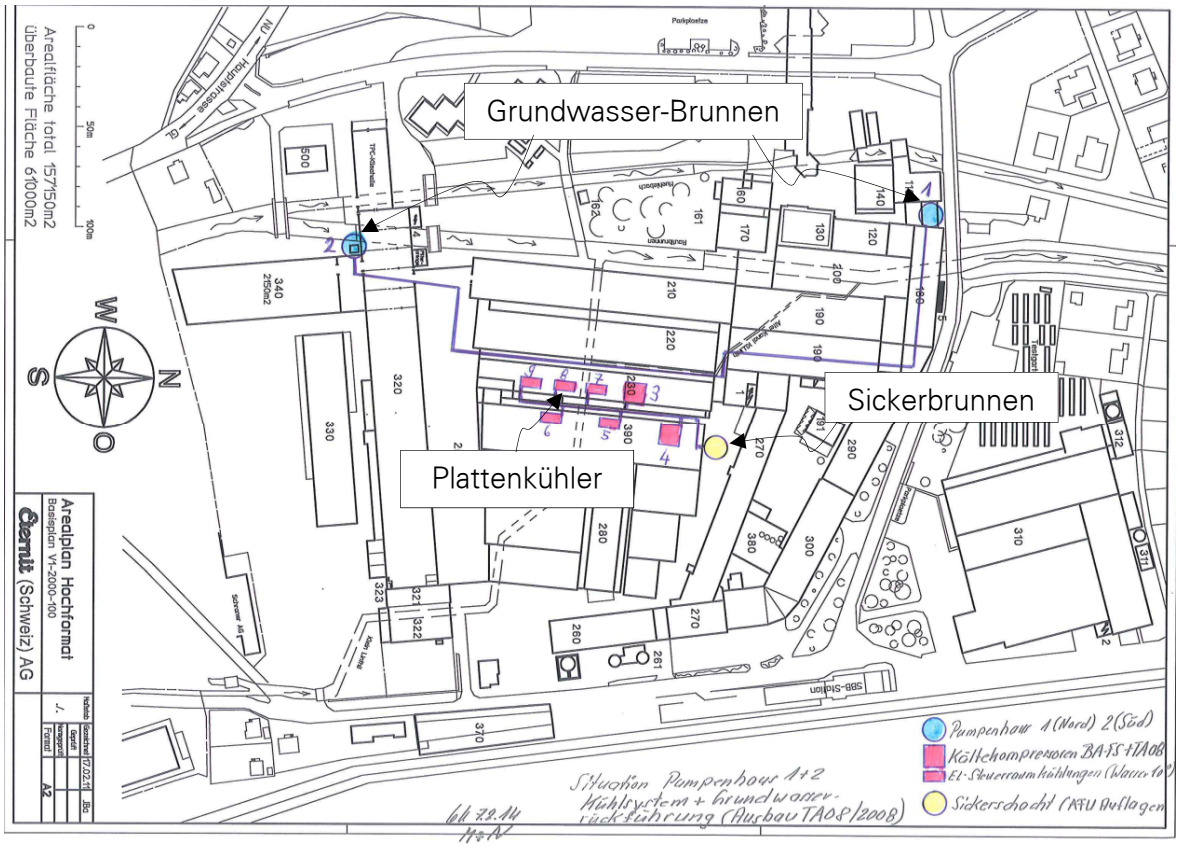


Abbildung 12: Areal der Eternit, Niederurnen, mit Grundwasserversorgung (Quelle: Eternit)

Mit den heute installierten Pumpen können 4 x 32 m^3/h Grundwasser gefördert werden. Bei 15 °C Rücklauftemperatur zum Sickerbrunnen und einer Abkühlung um 4 K liesse sich eine Wärmepumpe mit 600 kW Kälteleistung bzw. 800 kW Heizleistung betreiben[1]. Bei 800 kW Heizleistung könnte die Wärmepumpe bis zu einer Aussentemperatur von rund 7°C alleine und bei tieferen Temperaturen parallel zu den Heizkesseln betrieben werden. Die Wärmepumpe könnte so etwa 60% der jährlichen Heizenergie abdecken (vgl. Abbildung 13).

Zum heutigen Zeitpunkt wird die Hallenheizung mit zwei Heizkesseln mit je 1'750 kW Heizleistung betrieben. Die Heizkurve ist auf VL/RL 90°C/70°C eingestellt.

Die Effizienz einer Wärmepumpe hängt stark vom notwendigen Temperaturhub ab. Dieser sollte im Normalfall nicht höher als 40-50 K sein. Für eine Wärmepumpe, die bei 15°C Quellentemperatur bivalent-parallel betrieben wird (vgl. Abbildung 13), heisst das eine maximale Vorlauftemperatur von 55-65 °C. Abbildung 14 zeigt die theoretische Heizkurve der Anlage mit VL/RL 70°C/45°C, wobei die maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe 55°C beträgt. Eine solche Heizkurve wäre nötig, um eine Grundwasser-Wärmepumpe bei Eternit effizient zu betreiben. Damit auch bei Auslegefall (-8/20 °C)

[1] Seit dem 1.12.2013 muss bei Anlagen mit mehr als 600 kW mit natürlichen, d.h. in der Luft stabilen, Kältemitteln wie z.B. Ammoniak gearbeitet werden. Wärmepumpe mit natürlichem Kältemitteln weisen viele Vorteile bezüglich Ökologie und Energieeffizienz auf. Die Investitionskosten sind jedoch einiges höher als bei synthetischen Kältemitteln.

noch mit der Wärmepumpe gearbeitet werden kann, darf der Rücklauf in diesem Fall nicht mehr als 45 °C betragen. Mit der heutigen Anlage bei Eternit (Heizkurve VL/RL 90°C/70°C) wäre dieses Szenario nicht möglich, da die Heizkurven zu hoch eingestellt sind. Zudem wäre eine Rücklauftemperatur von 45°C nicht möglich, da auf dem Areal so genannte Umlenkschaltungen installiert sind. Wenn deren Verbraucher (typischerweise Lufterhitzer) keine Wärme benötigen, also im Teillastbetrieb sind (was meistens der Fall ist), pumpen solche hydraulischen Schaltungen heisses Vorlaufwasser über den Rücklauf zurück zum Heizungsverteiler bzw. zur Wärmeerzeugung. Eine Wärmepumpe kann in diesem Fall, d.h. bei zu hohen Rücklauftemperaturen, keine Wärme mehr über den Kondensator abgeben. Eine Störung wäre die Folge.

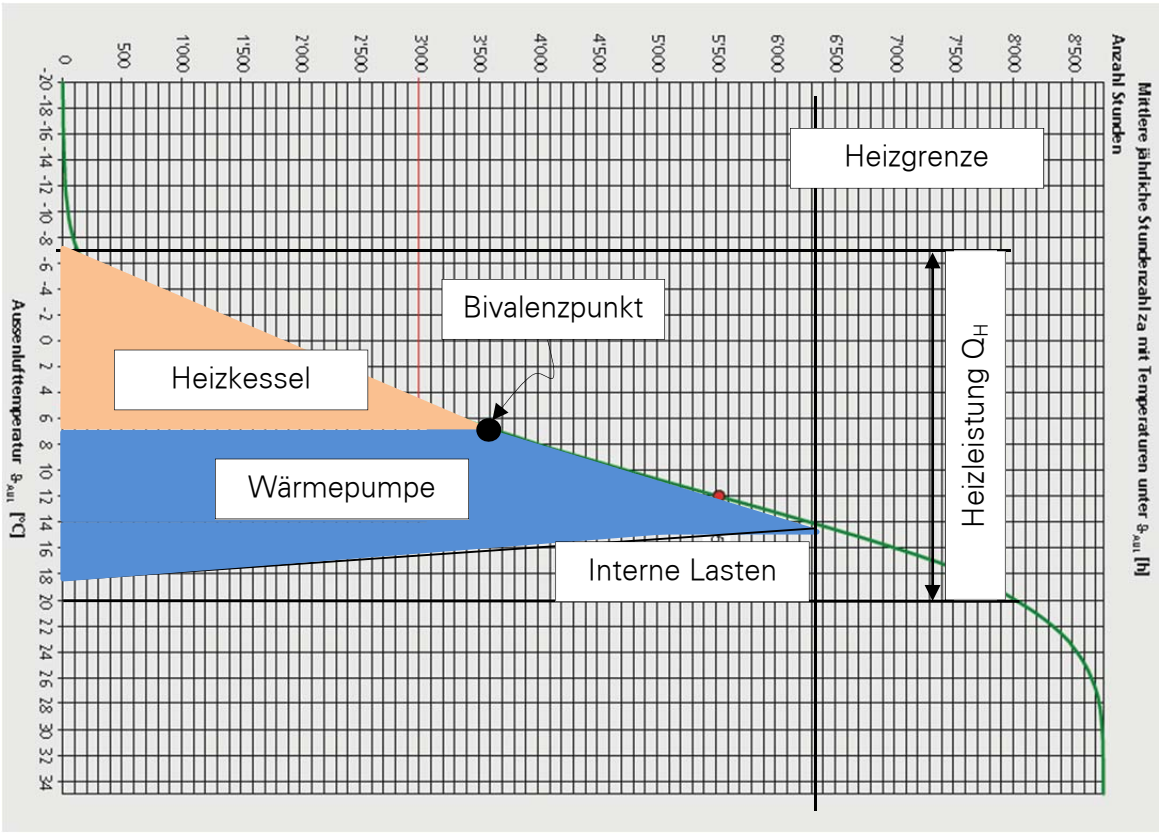


Abbildung 13: Jahresdauerlinie, Heizkessel mit Wärmepumpe, bivalent-parallel, 8°C/20°C

Damit eine Wärmepumpe betrieben werden kann, muss daher zuerst die Heizkurve, den Betriebsbedingungen entsprechend, abgesenkt werden. Für die technische Machbarkeit einer Wärmepumpe sind folgende Punkte ausschlaggebend:

- Möglichst tiefe Rücklauftemperatur auf der Heizungsanlage (d.h. keine Umlenkschaltungen bei der Wärmeverteilung)
- Möglichst hohe Rücklauftemperatur von der Grundwasserkühlung (d.h. diese sollte wenn möglich noch erhöht werden)
- Temperaturhub von max. 50 K für eine effiziente Wärmepumpe
- Alternative Wärmepumpensysteme prüfen, d.h. Anlagen mit natürlichen Kältemitteln
- Konvektive Hallenheizungen (z.B. Lufterhitzer und Heizkörper) mit maximal 18 °C Raumtemperatur betreiben

- Hallen mit Deckenstrahlplatten mit maximal 15°C Raumtemperatur
- Grundwasserbrunnen mit genügend hoher Kapazität für Plattenkühler und Wärmepumpe (d.h. es muss ein Pumpversuch gemacht werden)

Bei anteilsmässigen 60% der Wärmepumpe könnte diese im heutigen Fall rund 2'650 MWh/a der Heizenergie bereitstellen. Bei einem COP von 3.5 entspräche dies einem Strombedarf von 760 MWh/a. Der Anteil der Erdgaskessel würde sich somit auf 1'960 MWh/a beschränken. Der Energieaufwand (Strom und Erdgas) würde sich somit auf 2'720 MWh/a oder 56% vom momentanen Energieaufwand reduzieren (vgl. Berechnung im Anhang A.3).

Alternativ zu einer Wärmepumpe, die auf 600 kW Kälteleistung beschränkt ist, könnte eine Wärmepumpe mit natürlichen Kältemitteln wie z.B. Ammoniak (NH_3) geprüft werden. Mit der Spitzenkapazität der Grundwasserbrunnen von 2 x 80 m^3/h wäre eine Ammoniak-Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 1'000 kW realisierbar. Diese könnte gegen 75-80% des Heizenergiebedarfs von Eternit abdecken, da sie bis zu einer Aussentemperatur von 2-4 °C betrieben werden könnte. Zudem würde sich die Problematik der Rücklauftemperatur entschärfen, weil höhere Vorlauftemperaturen effizient möglich sind. Wobei auch die Rücklauftemperaturen mit einer Ammoniak-Wärmepumpe nicht höher als 55-60°C sein sollten.

Die Energieeinsparung einer Wärmepumpe wäre sehr gross. Trotzdem sind viele Faktoren zum heutigen Zeitpunkt offen bzw. im heutigen System nicht machbar. Die Machbarkeit einer solchen Anlage muss mit einer systematischen Betriebsoptimierung, d.h. Heizkurven senken und Umlenkschaltungen anpassen, ermittelt werden. Zudem sollte eine Variantenstudie eine Wärmepumpenanlage mit synthetischen und natürlichen Kältemitteln vergleichen. Ein Hauptkriterium für die Realisierung einer Wärmepumpe mit natürlichem Kältemittel ist der deutlich höhere COP. Allerdings sind auch die Investitionskosten deutlich höher. Die Fördermöglichkeiten wären abzuklären.

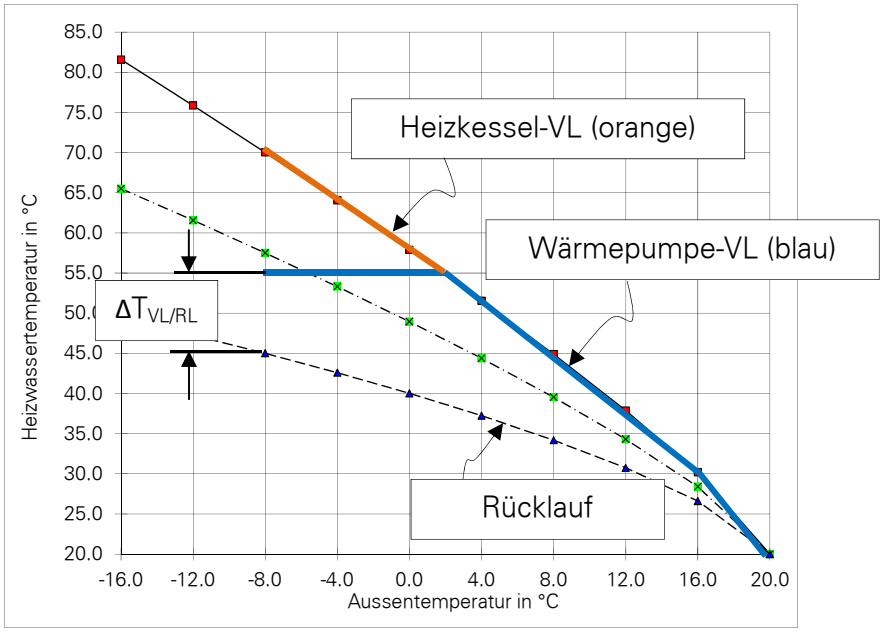


Abbildung 14: Heizkurve Heizkessel mit Wärmepumpe, bivalent-parallel, 70°C/45°C

4.1.3 Wirtschaftlichkeit Massnahmen Wärmeerzeugung

In Tabelle 6 sind die Massnahmen Wärmeerzeugung mit Energieeinsparung, Investitionskosten und entsprechendem Payback aufgeführt. Die Zahlen sind eine erste Einschätzung.

Die Investitionskosten für die Umrüstung auf Fernwärme sind zum heutigen Zeitpunkt nicht klar definierbar. Zuerst müsste vom Netzbetreiber geklärt werden, ob die Fernwärme mit oder ohne Übergabestation geliefert wird. Typischerweise liefert der Netzbetreiber den Anschluss an die Fernwärme exklusive Übergabestation bis ins Gebäude. Diese Kosten werden in Tabelle 6 ausgewiesen.

Für die Grundwasser-Wärmepumpe werden die Kosten für die aus energetischer und ökologischer Sicht effizientere Anlage ausgewiesen. Die Kosten entsprechen also einer Anlage mit Ammoniak als Kältemittel.

Anlage	Massnahme	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [a]
Heizungsanlagen Areal	Fernwärme KVA Linthgebiet	200	200'000.-	10
Heizungsanlagen Areal	Grundwasser-Wärmepumpe (Ammoniak)	-3'038 (Erdgas) +1'103 (Strom)	1'950'000.-	9.3

Tabelle 6: Massnahmenliste Wärmeerzeugung

4.2 Wärmeverteilung

4.2.1 Betriebsoptimierung Fabrikheizungen und Verwaltung

Die Heizungsanlagen der Eternit werden heute mit einer Heizkurve mit VL/RL 90/70°C betrieben. Dabei wird die Vorlauftemperatur der Heizzentrale über einen Aussentemperaturfühler ermittelt. Es darf davon ausgegangen werden, dass sich die heutigen Energieverbrauchswerte mit einer systematischen Betriebsoptimierung massiv reduzieren lassen. Typischerweise werden in der Praxis Werte von mindestens 10% erreicht. Die Heizungsanlagen, d.h. Fabrikheizungen[2] und Verwaltung, der Eternit verbrauchen heute rund 6'000 MWh/a Heizenergie (Abbildung 1). Bei einer Einsparung von 5-10% reduziert sich der Energieverbrauch um 300-600 MWh/a. Folgende Punkte sollten bei den Heizungsanlagen unbedingt geprüft werden:

- Systemtemperatur-Sollwerte und Heizgrenze (12°C nach SIA 381/3) überprüfen. Die Systemtemperaturen können in Schritten von z.B. 5 K über eine Heizperiode abgesenkt werden. Die Absenkung der Heizgrenze muss als Prozess verstanden werden. Man versucht sich an die optimalen Betriebsbedingungen "heranzutasten".
- Unnötige Verbraucher abstellen
- Raumtemperaturen absenken, d.h. Tages-/Nacht-, Wochenendbetrieb

[2] Die Fabrikheizung bezieht sich auf die Wärmeerzeugung der Produktionshallen, d.h. die zwei Heizkessel (2 x 1'750 kW) der zentralen Wärmeerzeugung. Die Halle Swisspearl (BA-GF) wird nicht für die Massnahme "Betriebsoptimierung Fabrikheizung" mit einbezogen. Die Halle Swisspearl (BA-GF) wird unter der Massnahme "Hallenheizung Swisspearl" separat betrachtet.

- Zweitkessel in Übergangszeit ausschalten
- Schaltungen überprüfen, d.h. Umlenkschaltungen wenn möglich ersetzen, z.B. mit Einspritzschaltungen mit Drosselventil. Umlenkschaltungen sind ungeeignet für Fernwärmesysteme, Wärmepumpenanlagen oder kondensierende Heizkessel, da sie im Teillastbetrieb hohe Rücklauftemperaturen aufweisen.

4.2.2 Heizung Halle 320

Eine Begehung mit Thermografie-Kamera in der Halle 320 hat gezeigt, dass die Raumtemperaturen[3] zu einem grossen Teil homogen sind (Abbildung 15). Das Deckenheizsystem gibt Wärme mittels konvektiver Wärmeübertragung an die Luft (das Prinzip eines Heizkörpers) und mittels Strahlung an die Umgebungsflächen ab. Auf diese Weise wird praktisch die komplette Halle auf eine Temperatur von bis zu 22 °C beheizt. Die notwendige Raumtemperatur der hauptsächlich als Lagerfläche genutzten Halle liegt hingegen bei 15°C. Bei 5 K Absenkung würde sich der Energiebedarf gemäss Jahresdauerlinie um bis zu 30% reduzieren, d.h. 6% pro K Temperaturdifferenz (vgl. Abbildung 16). Bei 50 W/m^2 Heizleistung und einer Fläche von 17'500 m^2 entspricht dies rund 500 MWh/a.

Um diese Energieeinsparungen zu erreichen, sollten folgende Massnahmen bzw. Priorisierungen getroffen werden:

- Absenkung der Raumtemperatur durch schrittweise Anpassung der Heizkurve.
- Nachrüstung der Deckenheizung mit Reflektoren, die nach oben isoliert sind. Auf diese Weise kann die konvektive Wärmeabgabe minimiert bzw. die Wärmeabgabe mittels Strahlung maximiert werden.

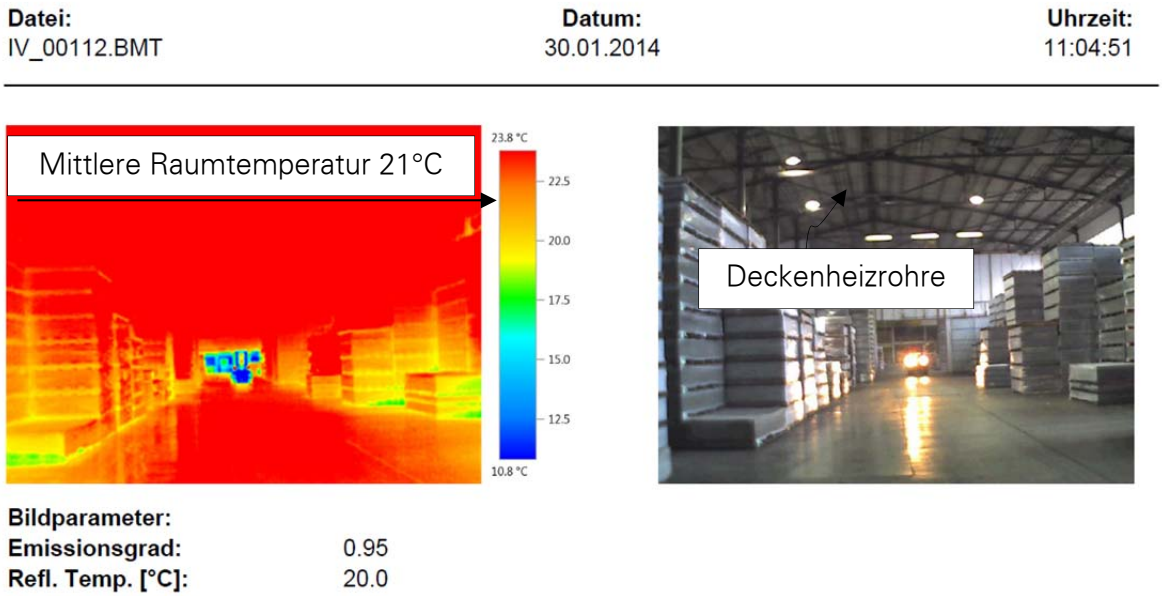


Abbildung 15: Thermografie-Aufnahme Eternit, Halle 320

Mit der Absenkung der Heizkurve wird die Vorlauftemperatur vom Heizsystem gesenkt. Dies hat zur Folge, dass die Raumluft- und Oberflächentemperatur absinkt. Im Raum wird

[3] Die Raumtemperaturen werden anteilsmässig über die Raumlufttemperatur und die Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen ermittelt.

sich eine klarere Temperatur-Schichtung als in Abbildung 15 ausbilden. Da die konvektive Wärmeabgabe immer noch ausgeprägt ist, sollte sich eine mittlere Raumtemperatur von rund 18°C einstellen. Die Absenkung der Heizkurve entspricht also einer Energieeinsparung von rund 18% bzw. 315 MWh/a.

Die zweite Massnahme, das Nachrüsten von Reflektoren, würde den konvektiven Anteil der Deckenheizung minimieren bzw. den Strahlungsanteil verbessern. Als Beispiel kann die Halle 330 mit Deckenstrahlplatten herangezogen werden (Abbildung 17). In der Halle 330 wird die Wärme über die Reflektoren verteilt und mittels Strahlung an die Oberflächen abgegeben. Die konvektive Wärmeabgabe ist dank der Reflektoren klein.

Das Nachrüsten von Reflektoren in der Halle 320 sollte die mittlere Raumtemperatur um weitere 2 K auf 16°C absenken. Eine Einsparung von weiteren 200 MWh/a wäre möglich.

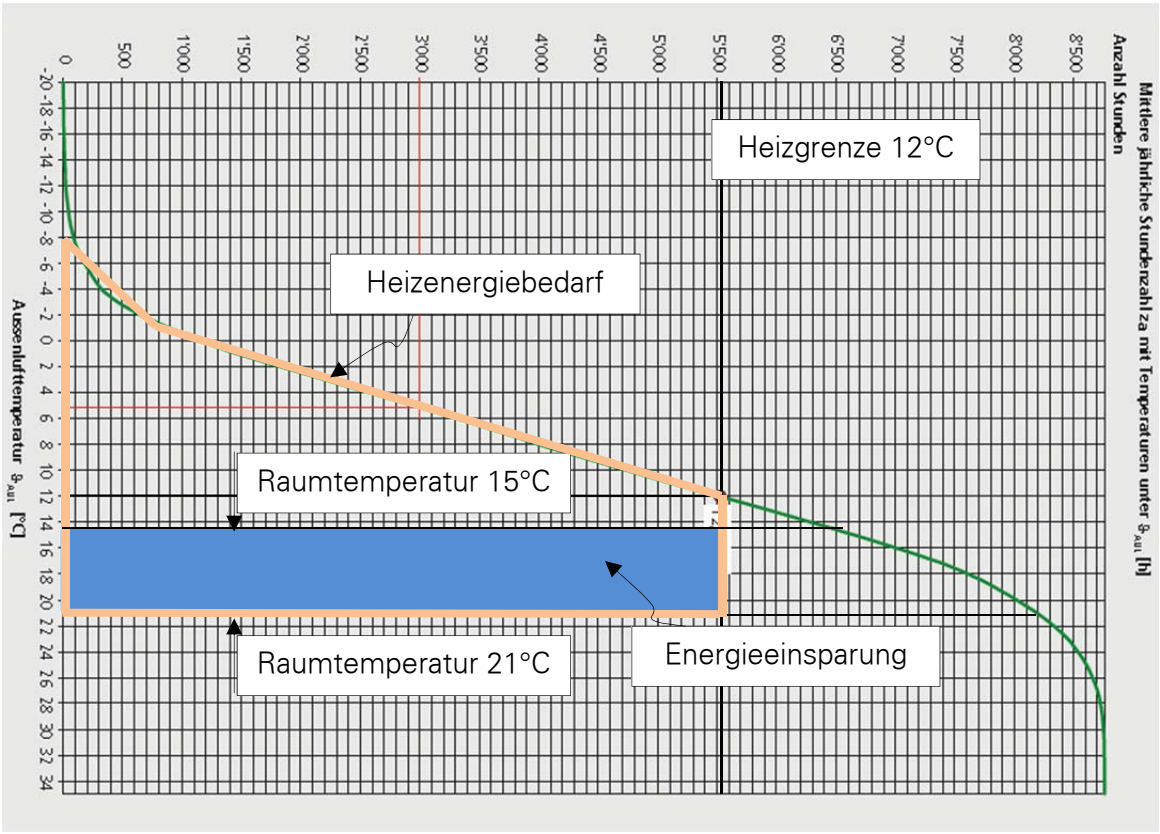


Abbildung 16: Jahresdauerlinie, Raumtemperaturabsenkung um 5 K, Heizgrenze 12°C

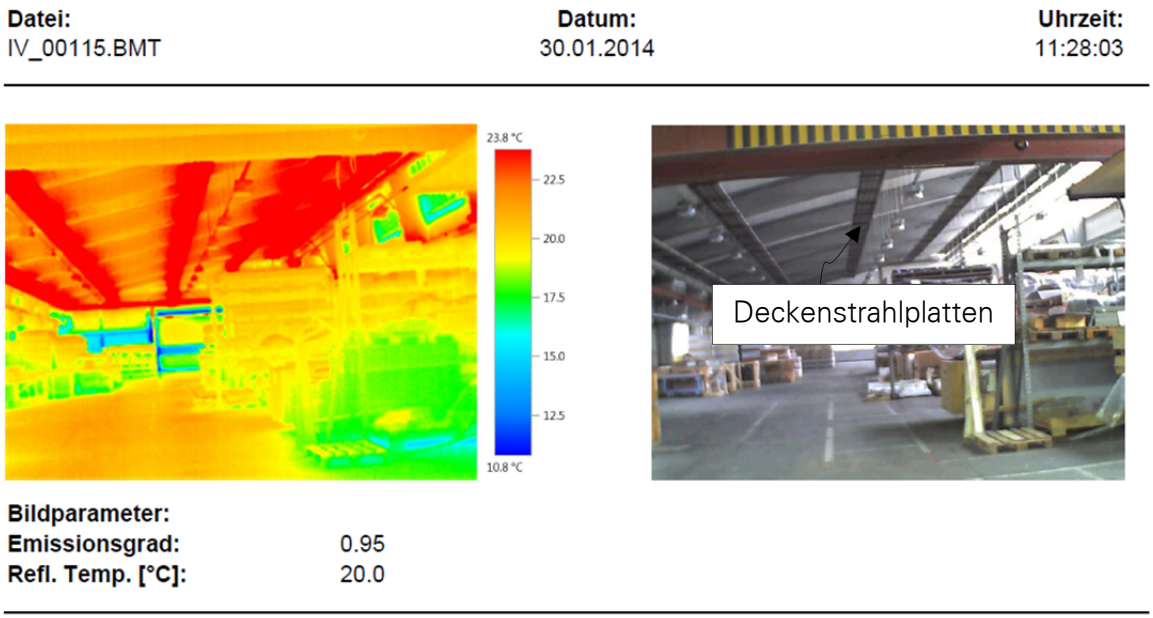


Abbildung 17: Thermografie-Aufnahme Eternit, Halle 330

4.2.3 Hallenheizung Swisspearl

Die Gebäudeheizung der Swisspearl wurde bisher mit Heisswasser betrieben. Dazu wurden die Lufterhitzer direkt mit 180°C Vorlauftemperatur bewirtschaftet. Vor kurzem sind einige Lufterhitzer ausgefallen. Diese wiesen Leckagen auf, die zu Dampfaustritt aus dem Netz führten. Die Heizung wird im Moment aus Sicherheitsgründen mit einem provisorischen Erdgas-Heizkessel betrieben.

Idealerweise würden die Lufterhitzer auch in Zukunft autonom vom 180°C Heisswassernetz betrieben. Als Lösung würden sich Lufterhitzer, die entweder mit einem separaten Wärmeerzeuger oder direkt mit Erdgas betrieben sind, anbieten. Zum jetzigen Zeitpunkt sind Lufterhitzer, die über das bestehende Wassersystem betrieben werden, die beste Lösung. Der grosse Nachteil der mit Erdgas betriebenen Lufterhitzer ist, dass in Zukunft keine alternativen Energien mehr möglich sind. Es wird daher empfohlen, ein System zu wählen, dass möglichst flexibel bezüglich Wärmeerzeugung ist.

Als Übergangslösung könnten die Lufterhitzer weiterhin mit dem Heisswassernetz betrieben werden. Dazu muss ein neuer Umformer das Heisswasser von 180°C auf 70°C heruntermischen. Aus energetischer Sicht ist diese Massnahme nur provisorisch sinnvoll.

Alternativ zu den Lufterhitzern würden sich auch Deckenstrahlplatten anbieten. Diese können vorteilhaft mit ca. 20 K tieferen Vorlauftemperaturen betrieben werden. Deren Nachteil besteht in den massiv höheren Investitionskosten (ca. 4-fache Investitionskosten). Auf Grund der tiefen Temperaturen sind Deckenstrahlplatten allerdings das ideale Wärmeabgabesystem für eine Wärmepumpe.

Die Wärmeabgabe muss zukünftig auf Zonen unterteilt und mit Raumtemperaturregler auf 18°C betrieben werden. Da die Beschichtungsanlage BA-GF massiv in den Raum abstrahlt, kann das Heizsystem so effizient auf Lastwechsel reagieren.

Es wird davon ausgegangen, dass eine System-Trennung vom Dampfkessel mit einer Einsparung von mindestens 5-10% oder 100-150 MWh/a Heizenergie einhergehen würde.

4.2.4 Wirtschaftlichkeit Massnahmen Wärmeverteilung

In Tabelle 7 sind die Massnahmen Wärmeerzeugung mit Energieeinsparung, Investitionskosten und entsprechendem Payback aufgeführt. Für die Betriebsoptimierung werden Kosten für ein energo[4]-Abonnement und zusätzlich Investitionen für Änderungen in der Wärmeverteilung (z.B. Anpassung Umlenkschaltungen) eingerechnet. Der Wert ist konservativ angesetzt, da die anfallenden Kosten zum heutigen Zeitpunkt nicht genau ermittelt werden können.

Die Reflektoren für die Halle 320 werden nur zu einem Teil für die Energieeinsparung eingerechnet (vgl. Massnahme "Heizung Halle 320" Priorität 2).

Für die Hallenheizung Swisspearl werden zwei Varianten aufgeführt: Die (z.T. bestehenden) Wasser-Lufterhitzer mit Umformer vom Dampfkessel und die autonomen Erdgas-Lufterhitzer. Für die Variante Wasser-Lufterhitzer werden zusätzlich sechs neue Lufterhitzer eingerechnet.

Anlage	Massnahme	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [a]
Fabrikheizung und Verwaltung	Betriebsoptimierung	300	210'000.-	7
Heizung Halle 320	Reflektoren	200	160'000.-	8
Hallenheizung Swisspearl (Variante 1)	Wasser-Lufterhitzer	100	72'000.-	7.2
Hallenheizung Swisspearl (Variante 2)	Erdgas-Lufterhitzer	100	90'000.-	9

Tabelle 7: Massnahmenliste Wärmeverteilung

4.3 WRG Heizungsanlagen

4.3.1 WRG Druckluftanlagen

Eternit hat Druckluftanlagen mit 450 kW elektrischer Leistungsaufnahme in Betrieb. Von der elektrischen Leistungsaufnahme werden typischerweise 90% direkt in Wärme umgewandelt.

Bei Eternit wird die Abwärme bereits konsequent zur Unterstützung der Hallenheizung verwendet. Dabei wird diese direkt aus dem Kompressor-Raum in die Fabrikhallen eingeblasen. Bei 1'500 h Betriebszeit, 60% Auslastung und 70% Abwärmenutzung dürfte die WRG etwa 250 MWh/a Energie liefern. Dies entspricht 5% des Energieverbrauchs der Fabrikheizung. Weitere Massnahmen in diesem Bereich braucht es nicht.

[4] energo ist ein Schweizer Kompetenzzentrum für Energieeffizienz in Gebäuden. Mit Unterstützung von EnegieSchweiz führt energo systematische Betriebsoptimierungen bei HLK-Anlagen durch.

4.3.2 Abgasrekuperatoren bestehende Heizkessel

Heizkessel können mit externem Abgaswärmetauscher, so genannten Abgasrekuperatoren, ausgestattet werden. Diese kühlen die Abgase der Heizkessel möglichst weit ab und führen die Wärme dem Heizsystem zu. Die mittlere Abgastemperatur eines Heizkessels liegt typischerweise bei etwa 130-160°C. Für die Berechnung der Massnahme wurden folgende Annahmen getroffen:

- Abkühlung der Abgase bei Eternit im Durchschnitt um 50 K, von 140°C auf 90°C
- Durchschnittliche Leistung der Fabrikheizung 1'100 kW
- Betriebszeit der Heizung 2'000 h
- Auf Grund der hohen Betriebstemperaturen ist keine Abgaskondensation möglich (bei Erdgas liegt die Kondensationstemperatur bei 60°C)
- Trockener Abgasvolumenstrom 1'800 m^3/h
- Wirkungsgrad Abgasrekuperator 90%

Für die Heizungsanlage ergibt sich somit eine WRG-Leistung von 40 kW. Mit einer Betriebszeit von 2'000 h können somit rund 80 MWh/a Energie an das Heizungssystem abgegeben werden.

4.3.3 Wirtschaftlichkeit Massnahmen WRG Heizungsanlagen

In sind die Massnahmen Wärmeerzeugung mit Energieeinsparung, Investitionskosten und entsprechendem Payback aufgeführt. Die Zahlen sind eine erste Einschätzung.

Für die Kosten der Abgasrekuperatoren muss eingerechnet werden, dass die Kesselanlagen um mindestens einen Meter verschoben werden müssten. Sämtliche Kesselanschlüsse müssten deshalb angepasst werden.

Anlage	Massnahme	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [a]
Druckluftanlagen	Abwärme WRG	250	-	-
Heizkessel (2 x 1'750 kW)	Rekuperatoren	80	90'000.-	11.5

Tabelle 8: Massnahmenliste WRG Heizungsanlagen

4.4 Zusammenfassung Heizungsanlagen

In Tabelle 9 sind alle Massnahmen aufgeführt, die aus der Energieanalyse der Gebäudeheizung resultieren.

Die statische Bewertung zeigt, dass zwei Massnahmen, die Grundwasser-Wärmepumpe und die Abgas-Rekuperatoren, den geforderten statischen Payback von acht Jahren für Infrastruktur für den Einbezug in den Zielvorschlag für das Emissionsziel nicht erfüllen. Dies ist eine erste grobe Bewertung der Massnahmen. Bevor jedoch über die Umsetzung entschieden wird, müssen die Massnahmen zusätzlich dynamisch bewertet werden (z.B. mit der Barwert-Methode). Zudem müssen die grössten Eingriffe, wie ein Fernwärmeanschluss oder Grundwasser-Wärmepumpe, unbedingt noch in einer Variantenstudie vertieft werden.

Für die Halle Swisspearl ist die Massnahme aufgeführt, die zur weiteren Prüfung empfohlen wird.

Eine detailliertere, dynamische Betrachtung wird wichtige Resultate bezüglich Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und weiterem Vorgehen aufzeigen.

Anlage	Massnahme	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [a]
Heizungsanlagen Areal	Fernwärme KVA Linthgebiet	300	200'000.-	10
Heizungsanlagen Areal	Grundwasser-Wärmepumpe (Ammoniak)	-3'675 (Erdgas) +1'103 (Strom)	1'950'000.-	9.2
Fabrikheizung und Verwaltung	Betriebsoptimierung	300	210'000.-	7
Heizung Halle 320	Reflektoren	200	160'000.-	8
Hallenheizung Swisspearl	Wasser-Lufterhitzer	100	72'000.-	7.2
Druckluftanlagen	Abwärme WRG	250	-	-
Heizkessel (2 x 1'750 kW)	Rekuperatoren	80	90'000.-	11.5

Tabelle 9: Massnahmenliste Heizungsanlagen

5. Empfehlung

Die Pinch-Analyse der Prozessanlagen und der Heizungsanlagen haben gezeigt, dass bei Eternit ein beträchtliches Einsparpotenzial vorhanden ist. Insbesondere bei den Heizungsanlagen wird das Potenzial als sehr gross eingeschätzt.

5.1 Prozessanlagen

Bei den Prozessanlagen sollte das KVS-System für die Beschichtungsanlage BA-GF mit einem Anlagenbauer im Detail geprüft werden. Insbesondere gilt es zu klären, ob der Plattentrockner in naher Zukunft vom Netz genommen wird. Eine neue WRG würde in diesem Fall keinen Sinn machen. Bei der Beschichtungsanlage BA-WP zeigt sich nur beim Vorwärmer WRG-Potenzial. Eine erste Einschätzung von einem Anlagenbauer wurde gemacht. Die Umsetzung eines KVS-Systems wird als schwierig eingestuft.

5.2 Heizungsanlagen

Bei den Heizungsanlagen ist sehr grosses Effizienzpotenzial vorhanden. Ausser wenn ein finanziell sehr attraktiver Fernwärmeanschluss realisiert werden kann, sollte eine Grundwasser-Wärmepumpe weiter verfolgt werden. Diese könnte im besten Fall 80% der Heizenergie bei Eternit abdecken. Es ist aber wichtig zu beachten, dass die Anlage im heutigen Wärmeverteilsystem nicht machbar ist. Die Heizkurven sind zu hoch eingestellt und die Wärmeverteilung wird zum Teil mit Umlenkschaltungen gemacht. Aus diesem Grund ist eine vorgängige Betriebsoptimierung der Heizungsanlagen entscheidend. Dies lässt sich einfach umsetzen. Es müsste auch bei einem Fernwärmeanschluss gemacht werden. Auch bei Fernwärme sind die Umlenkschaltungen nicht mehr möglich.

Würden alle Massnahmen, ohne Wärmeerzeugung, umgesetzt, könnten rund 1'000 MWh/a Energie eingespart werden. Dies entspricht rund 15% vom Bedarf der heutigen Heizungsanlagen. Wenn zusätzlich eine Grundwasser-Wärmepumpe oder ein Fernwär-

meanschluss realisiert würde, würde sich die Gesamtenergieeinsparung auf 25-30% erhöhen.

Ein Fernwärmeabschluss ist, nach Absprache mit der KVA-Linthgebiet, frühestens ab 2016 denkbar. Eine Grundwasser-Wärmepumpe könnte, nach dem Entscheid gegen die Fernwärme, bereits ab Sommer 2014 näher in einer Vorstudie verfolgt werden. Ab sofort, 2014, sollte eine Betriebsoptimierung der Heizungsanlagen gemacht werden. Zeitgleich können die Hallen 320 mit Reflektoren und die Halle Swisspearl mit Lufterhitzer nachgerüstet werden.

Anhang

A.1 Arealplan Eternit

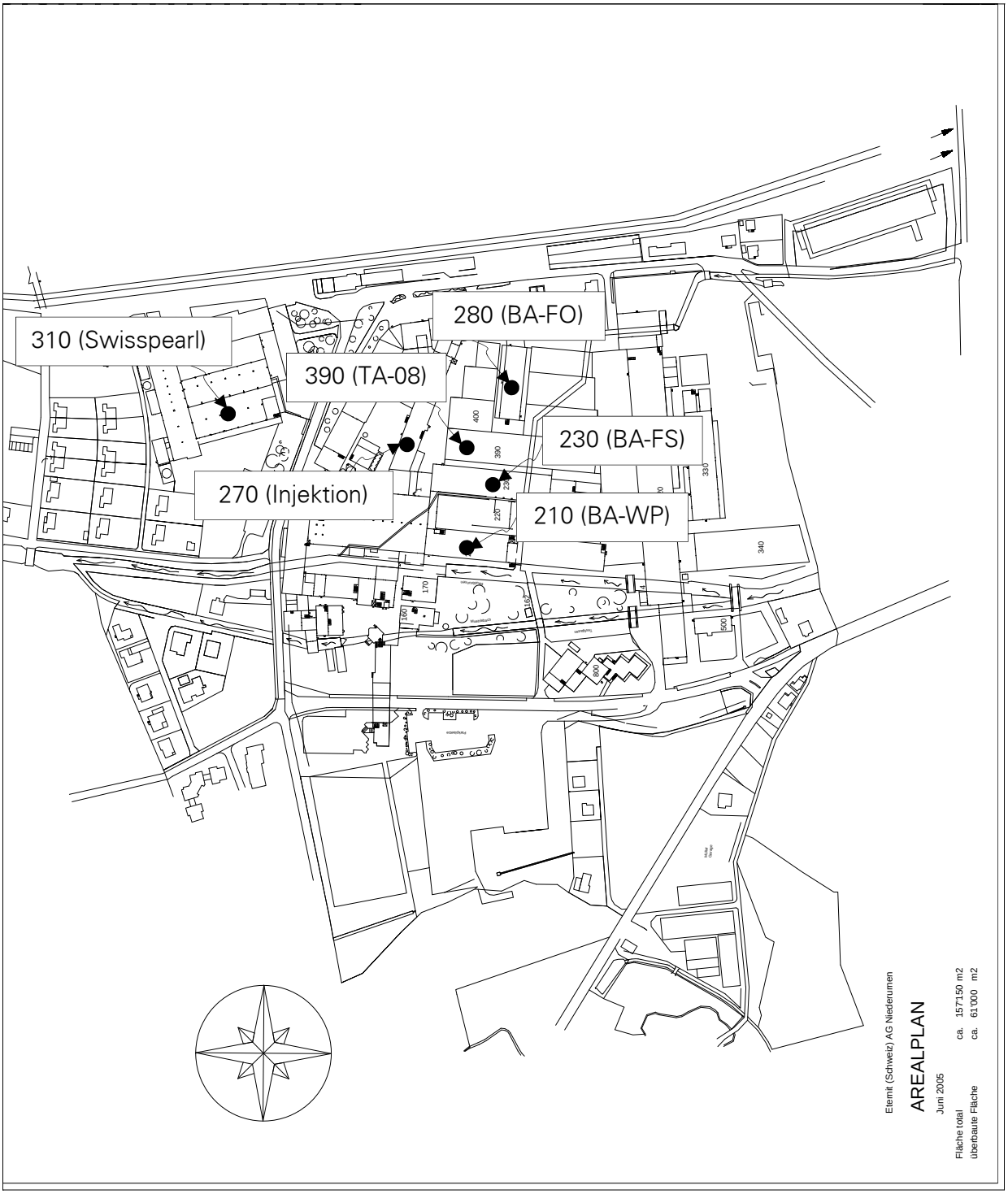


Abbildung 18: Arealplan Eternit(Schweiz) AG, Niederurnen

A.2 Prinzipschemata

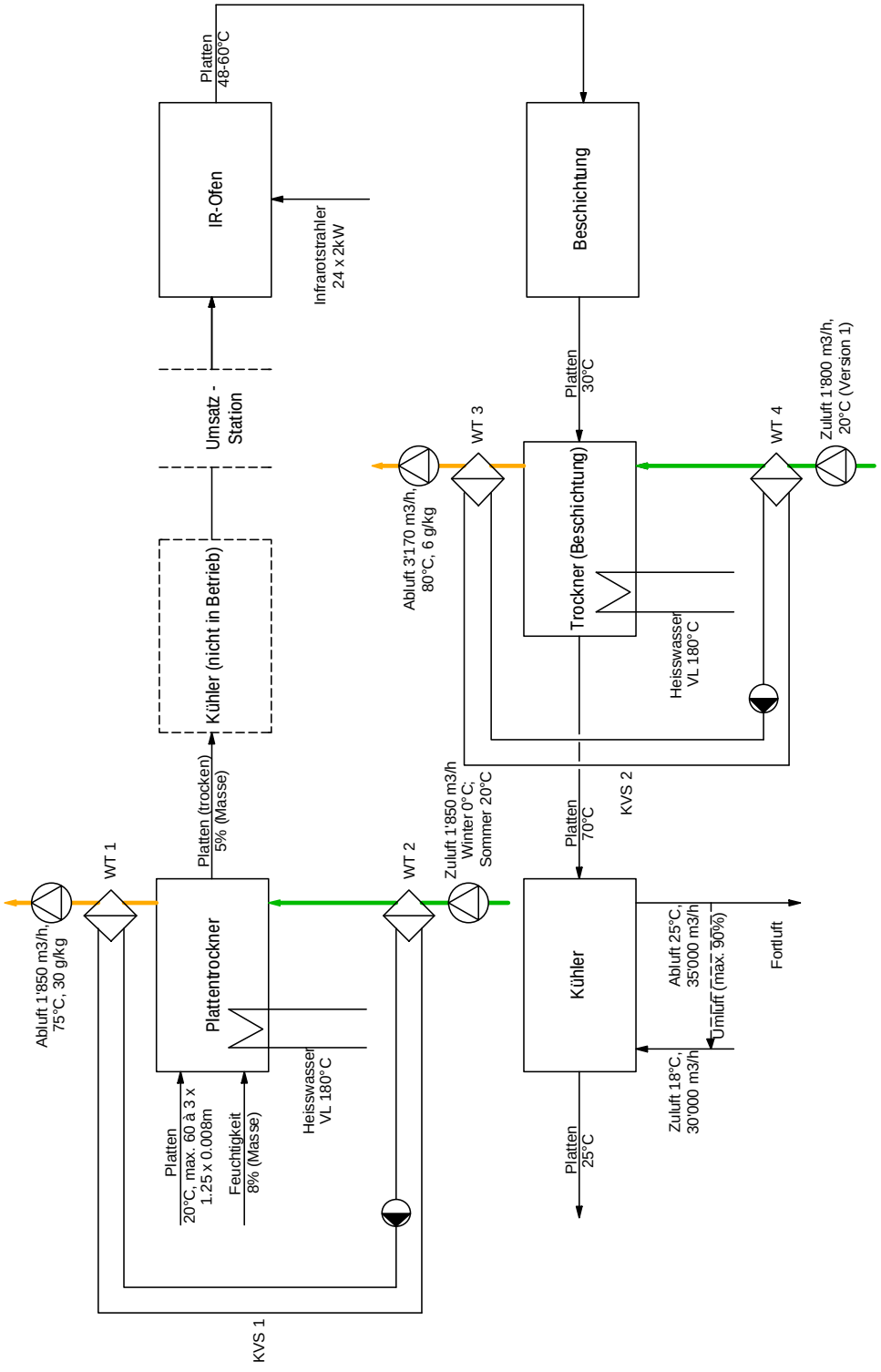


Abbildung 19: Prinzipschema Beschichtungsanlage BA-GF (Gebäude 310)

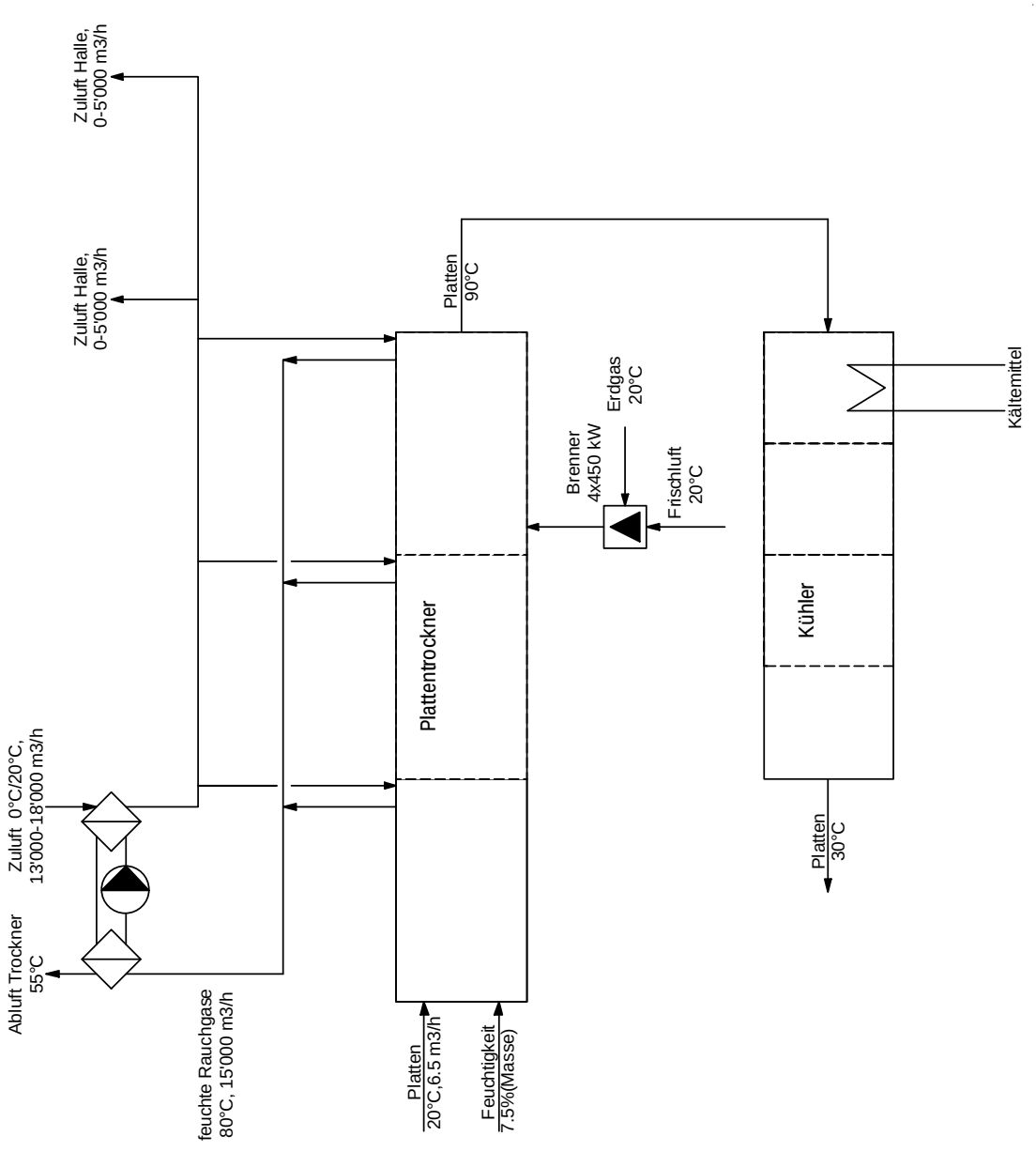


Abbildung 20: Prinzipschema Trocknungsofen TA-08 (Gebäude 390)

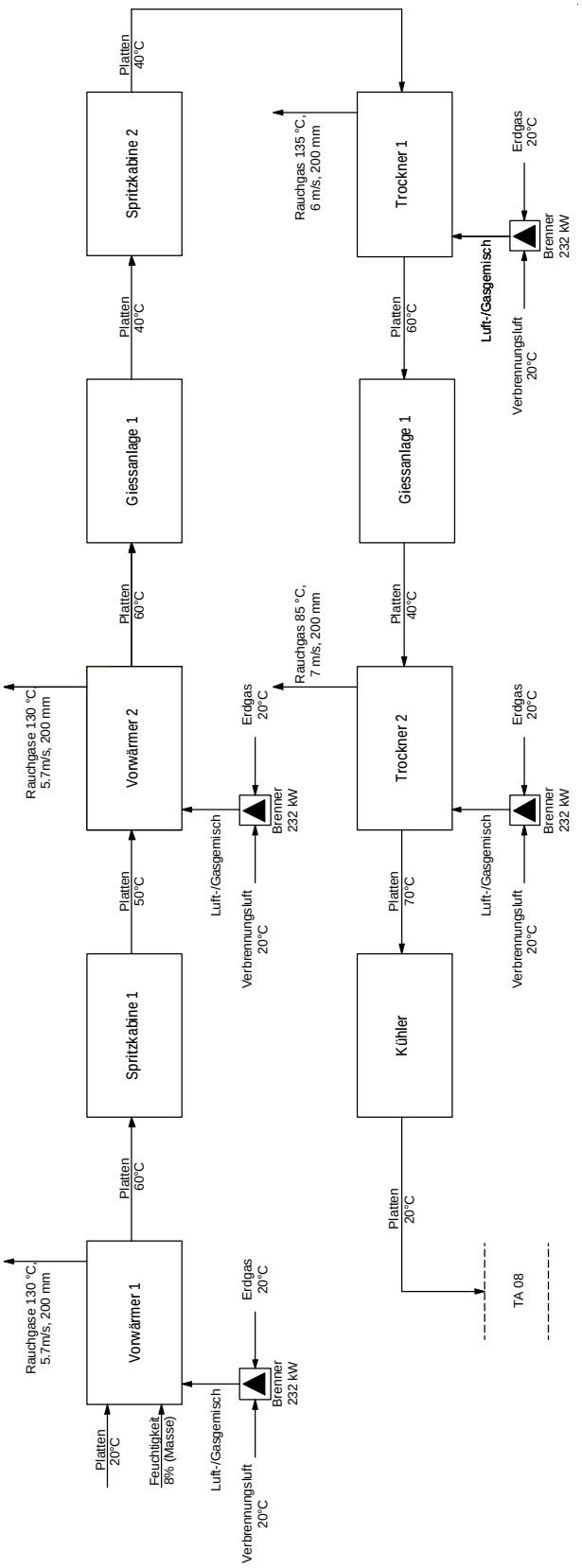


Abbildung 21: Prinzipschema Beschichtungsanlage BA-FS (Gebäude 230)

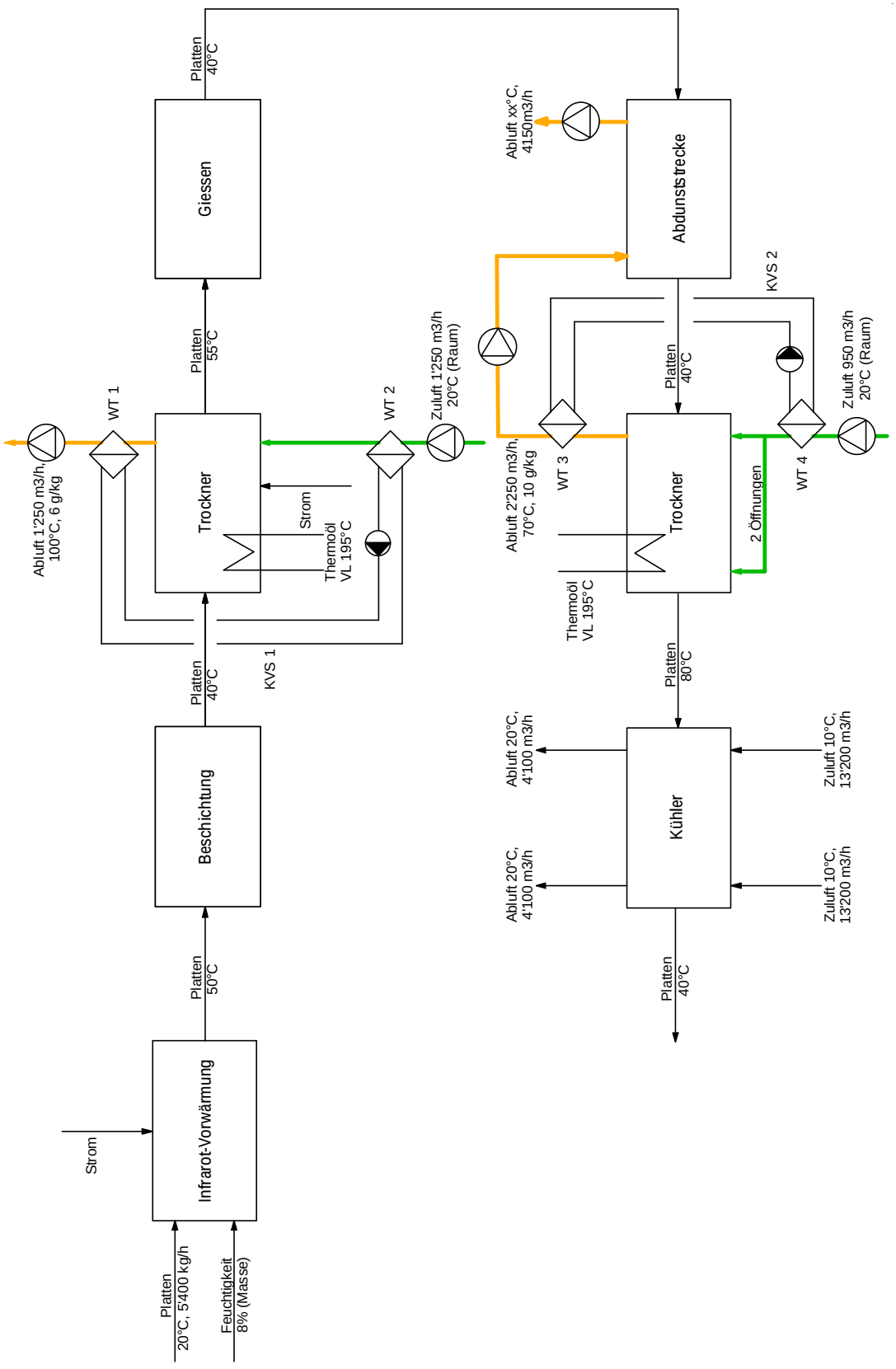


Abbildung 22: Prinzipschema Beschichtungsanlage BA-WP (Gebäude 210)

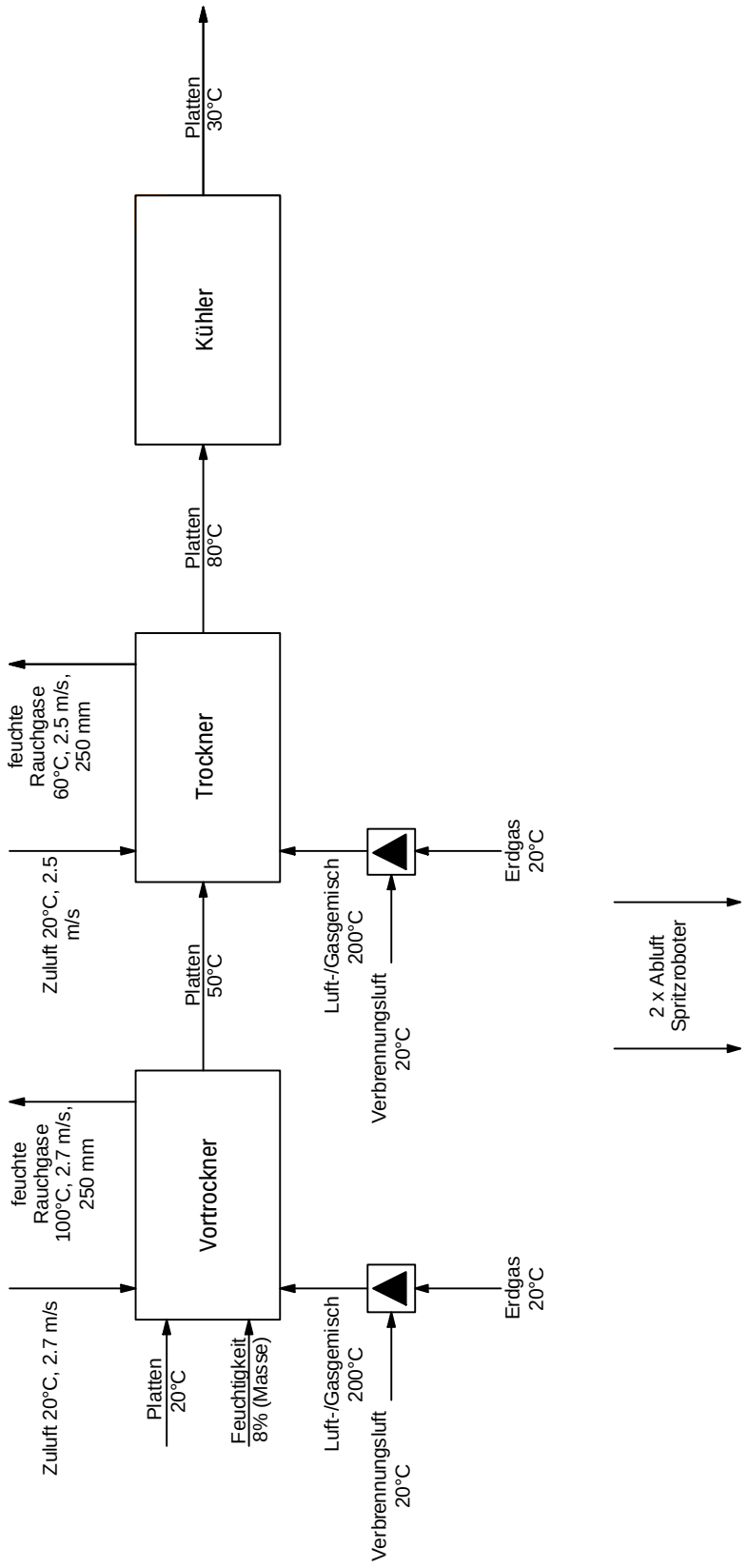
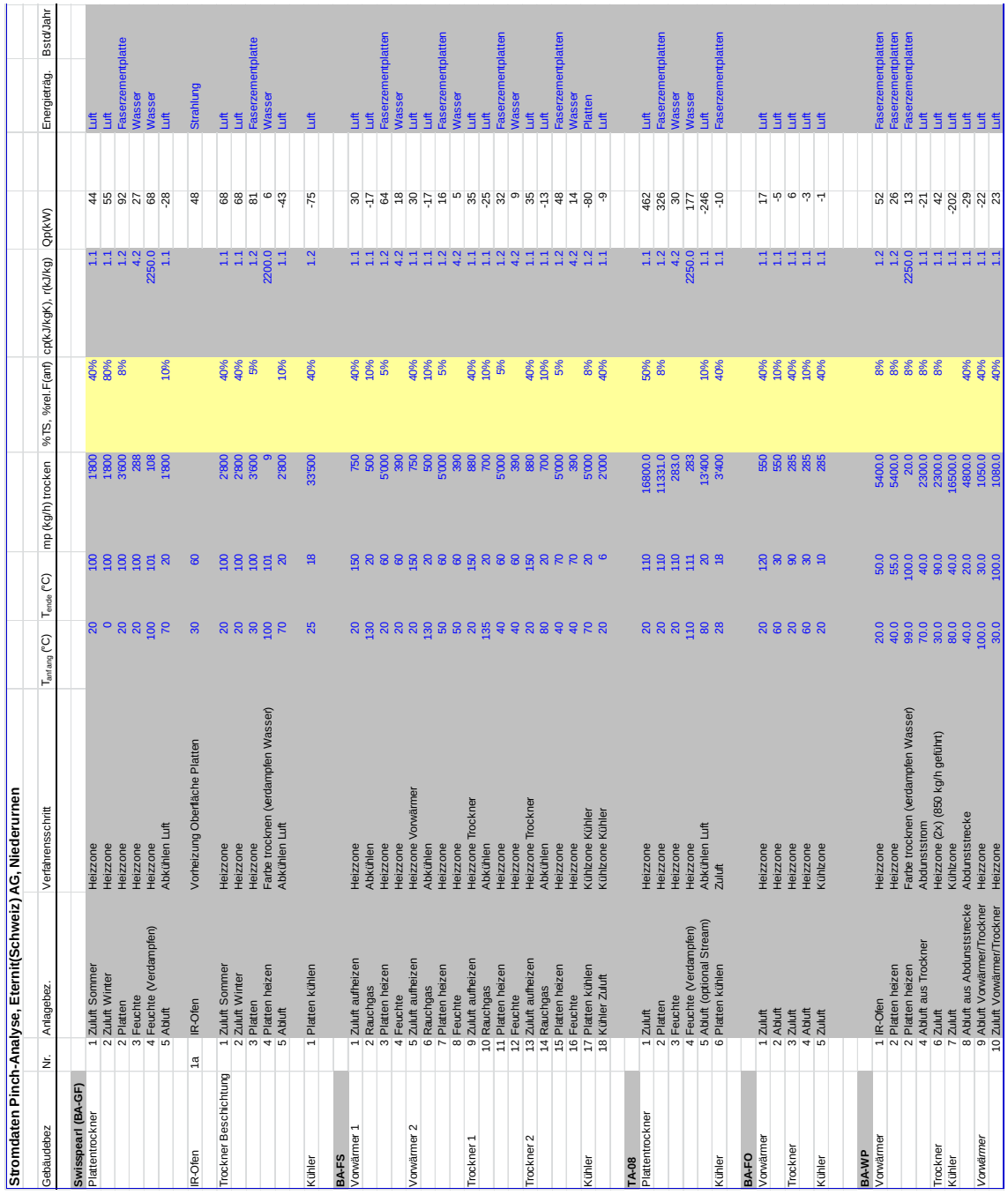


Abbildung 23: Prinzipschema Beschichtungsanlage BA-FO (Gebäude 280)

A.3 Stromdaten Pinch-Analyse



Stromdaten Pinch-Analyse, Eternit(Schweiz) AG, Niederurnen

Gebäudebez	Nr.	Anlagebez.	Verfahrensschritt	$T_{anf.ang}$ (°C)	T_{ende} (°C)	mp (kg/h) trocken	%TS	%rel.F(anf)	cp(kJ/kgK)	r(kJ/kg)	Qp(kW)	Energieträg.	Bstd/Jahr
Swisspearl (BA-GF)													
Plattentrockner	1	Zuluft Sommer	Heizzone	20	100	1'800		40%		1.1	44	Luft	
	2	Zuluft Winter	Heizzone	0	100	1'800		80%		1.1	55	Luft	
	2	Platten	Heizzone	20	100	3'600		8%		1.2	92	Faserzementplatte	
	3	Feuchte	Heizzone	20	100	288				4.2	27	Wasser	
	4	Feuchte (Verdampfen)	Heizzone	100	101	108				2250.0	68	Wasser	
	5	Abluft	Abkühlen Luft	70	20	1'800		10%		1.1	-28	Luft	
IR-Ofen	1a	IR-Ofen	Vorheizung Oberfläche Platten	30	60						48	Strahlung	
Trockner Beschichtung	1	Zuluft Sommer	Heizzone	20	100	2'800		40%		1.1	68	Luft	
	2	Zuluft Winter	Heizzone	20	100	2'800		40%		1.1	68	Luft	
	3	Platten	Heizzone	30	100	3'600		5%		1.2	81	Faserzementplatte	
	4	Platten heizen	Farbe trocknen (verdampfen Wasser)	100	101	9				2200.0	6	Wasser	
	5	Abluft	Abkühlen Luft	70	20	2'800		10%		1.1	-43	Luft	
Kühler	1	Platten kühlen		25	18	33'500		40%		1.2	-75	Luft	
BA-FS													
Vorwärmer 1	1	Zuluft aufheizen	Heizzone	20	150	750		40%		1.1	30	Luft	
	2	Rauchgas	Abkühlen	130	20	500		10%		1.1	-17	Luft	
	3	Platten heizen	Heizzone	20	60	5'000		5%		1.2	64	Faserzementplatten	
	4	Feuchte	Heizzone	20	60	390				4.2	18	Wasser	
Vorwärmer 2	5	Zuluft aufheizen	Heizzone Vorwärmer	20	150	750		40%		1.1	30	Luft	
	6	Rauchgas	Abkühlen	130	20	500		10%		1.1	-17	Luft	
	7	Platten heizen	Heizzone	50	60	5'000		5%		1.2	16	Faserzementplatten	
	8	Feuchte	Heizzone	50	60	390				4.2	5	Wasser	
Trockner 1	9	Zuluft aufheizen	Heizzone Trockner	20	150	880		40%		1.1	35	Luft	
	10	Rauchgas	Abkühlen	135	20	700		10%		1.1	-25	Luft	
	11	Platten heizen	Heizzone	40	60	5'000		5%		1.2	32	Faserzementplatten	
	12	Feuchte	Heizzone	40	60	390				4.2	9	Wasser	
Trockner 2	13	Zuluft aufheizen	Heizzone Trockner	20	150	880		40%		1.1	35	Luft	
	14	Rauchgas	Abkühlen	80	20	700		10%		1.1	-13	Luft	
	15	Platten heizen	Heizzone	40	70	5'000		5%		1.2	48	Faserzementplatten	
	16	Feuchte	Heizzone	40	70	390				4.2	14	Wasser	
Kühler	17	Platten kühlen	Kühlzone Kühler	70	20	5'000		8%		1.2	-80	Platten	
	18	Kühler Zuluft	Kühlzone Kühler	20	6	2'000		40%		1.1	-9	Luft	
TA-08													
Plattentrockner	1	Zuluft	Heizzone	20	110	16800.0		50%		1.1	462	Luft	
	2	Platten	Heizzone	20	110	11331.0		8%		1.2	326	Faserzementplatten	
	3	Feuchte	Heizzone	20	110	283.0				4.2	30	Wasser	
	4	Feuchte (Verdampfen)	Heizzone	110	111	283				2250.0	177	Wasser	
	5	Abluft (optional Stream)	Abkühlen Luft	80	20	13'400		10%		1.1	-246	Luft	
Kühler	6	Platten kühlen	Zuluft	28	18	3'400		40%		1.1	-10	Faserzementplatten	
BA-FO													
Vorwärmer	1	Zuluft	Heizzone	20	120	550		40%		1.1	17	Luft	
	2	Abluft	Heizzone	60	30	550		10%		1.1	-5	Luft	
Trockner	3	Zuluft	Heizzone	20	90	285		40%		1.1	6	Luft	
	4	Abluft	Heizzone	60	30	285		10%		1.1	-3	Luft	
Kühler	5	Zuluft	Kühlzone	20	10	285		40%		1.1	-1	Luft	
BA-WP													
Vorwärmer	1	IR-Ofen	Heizzone	20.0	50.0	5400.0		8%		1.2	52	Faserzementplatten	
	2	Platten heizen	Heizzone	40.0	55.0	5400.0		8%		1.2	26	Faserzementplatten	
	2	Platten heizen	Farbe trocknen (verdampfen Wasser)	99.0	100.0	20.0		8%		2250.0	13	Faserzementplatten	
	4	Abluft aus Trockner	Abduststrom	70.0	40.0	2300.0		8%		1.1	-21	Luft	
Trockner	6	Zuluft	Heizzone (2x) (850 kg/h geführt)	30.0	90.0	2300.0		8%		1.1	42	Luft	
Kühler	7	Zuluft	Kühlzone	80.0	40.0	16500.0				1.1	-202	Luft	
	8	Abluft aus Abduststrecke	Abduststrecke	40.0	20.0	4800.0		40%		1.1	-29	Luft	
Vorwärmer	9	Abluft Vorwärmer/Trockner	Heizzone	100.0	30.0	1050.0		40%		1.1	-22	Luft	
	10	Zuluft Vorwärmer/Trockner	Heizzone	30.0	100.0	1080.0		40%		1.1	23	Luft	

Abbildung 24: Stromtabelle der Pinch-Analyse

A.4 Berechnung Wärmepumpe

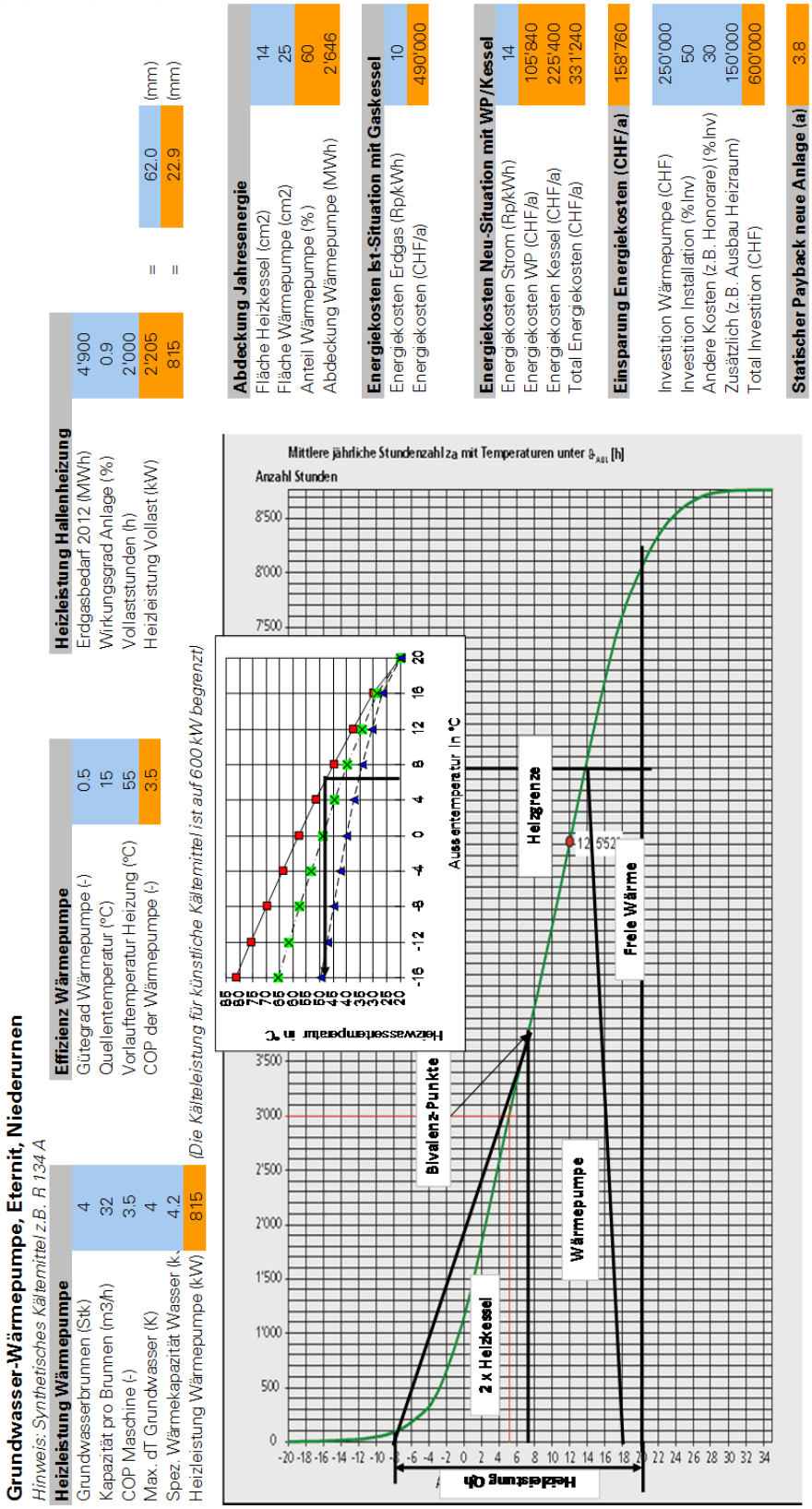


Abbildung 25: Berechnung Grundwasser-Wärmepumpe mit synthetischem Kältemittel (z.B. R134a)

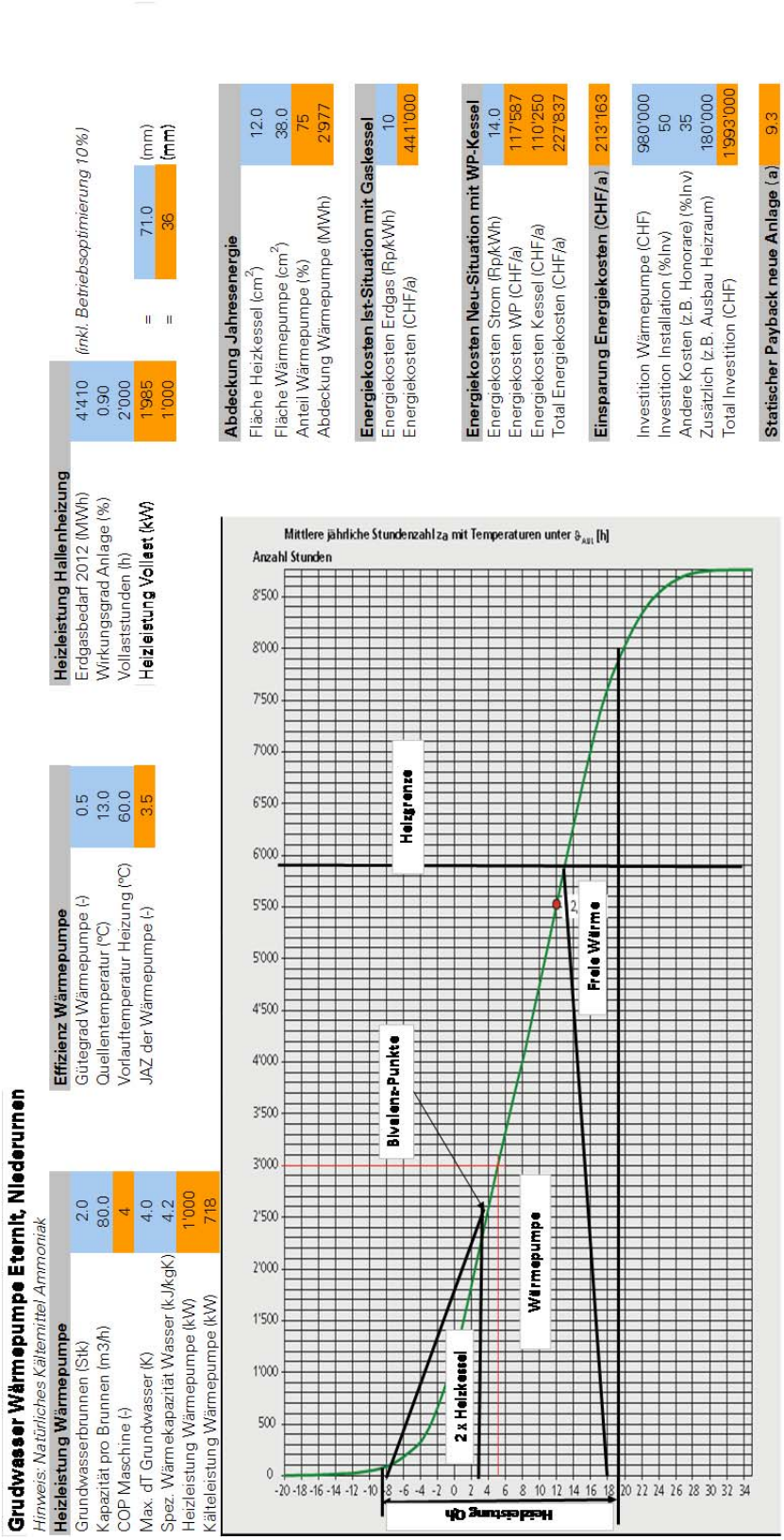


Abbildung 26: Berechnung Grundwasser-Wärmepumpe mit natürlichem Kältemittel (z.B. NH_3)