

Schlussbericht 25. August 2014

# **Giessereibetrieb**

## Pinch-Analyse Prozessanlagen und Heizungsanlagen

**Auftraggeber**

Giessereibetrieb

**Auftragnehmer**

Weisskopf Partner GmbH  
Albisriederstrasse 184b  
8047 Zürich

**Autoren**

Patrick Felder  
Urs Flückiger  
Thomas Weisskopf  
Thomas Bürki GmbH, Benglen

**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](mailto:contact@bfe.admin.ch); [www.energie-schweiz.ch](http://www.energie-schweiz.ch)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Ausgangslage .....</b>	<b>6</b>
1.1 Allgemein .....	6
1.2 Energiesituation .....	6
<b>2. Thermische Prozesse .....</b>	<b>8</b>
2.1 Schmelzöfen .....	8
2.2 Pfannenvorwärmstationen .....	15
2.3 Wärmebehandlung .....	16
2.4 Maschinenkühlung .....	17
<b>3. Pinch-Analyse .....</b>	<b>18</b>
3.1 Vorgehen Pinch-Analyse .....	18
3.2 Pinch-Analyse .....	20
<b>4. Massnahmen aus Pinch-Analyse .....</b>	<b>31</b>
4.1 Massnahmen Prozessanlagen .....	31
4.2 Massnahmen WRG Heizungsanlagen .....	32
4.3 Massnahmen Rückkühlung .....	32
4.4 Massnahmen ORC / Climeworks .....	33
<b>5. Empfehlung .....</b>	<b>33</b>
5.1 Schmelzbetrieb .....	33
5.2 Rückkühlanlage .....	34
5.3 WRG in Heizungsanlage .....	35
5.4 Wärmepumpe Heizungsanlage .....	35
5.5 Fernwärme-/kälte .....	36
5.6 ORC / Climeworks .....	36

## Zusammenfassung

Der Giessereibetrieb stellt hochwertige Produkte aus Aluminium-, Magnesium- und Zink-Druckguss her, wobei in Zukunft der Zink-Druckguss aufgegeben wird.

Der Energiebedarf im Betrieb betrug im Jahr 2012 14 GWh Erdgas, 21 GWh Strom und knapp 0.1 GWh Heizöl. Auf dem Areal wird im Dreischichtbetrieb, teilweise auch samstags, gearbeitet.

Der Betrieb betreibt eine Schmelzerei mit fünf Schachtschmelzöfen. Bis zum fertigen Druckgussteil werden neben den Schmelzöfen auch Pfannenvorwärmstationen (PVS), Druckgussmaschinen und Wärmebehandlungsanlagen betrieben.

Der grosse Erdgasverbrauch wird hauptsächlich durch die Schmelzöfen, die Pfannenvorwärmstationen und die Heizung verursacht. Sie bilden den "grossen Hebel" zur Steigerung der Energieeffizienz. Der Stromverbrauch ist hauptsächlich auf die Druckgussmaschinen, die Magnesium-Schmelzöfen und die Wärmebehandlungsanlagen zurückzuführen.

Der vorliegende Bericht zeigt eine energetische Analyse vom Werk. Auf Grund der Komplexität und der Vielfalt der Anlagen wurde bei den thermischen Prozessanlagen mit einer Pinch-Analyse gearbeitet.

Die Pinch-Analyse hat aufgezeigt, dass die Schmelzöfen sehr viel mehr Energie für den Schmelzbetrieb benötigen, als effektiv für das Produkt nötig wäre. Dies ist vor allem auf die tiefe Auslastung der Öfen zurückzuführen. Dadurch werden sie hauptsächlich zum Warmhalten von Metall-Schmelze verwendet. Effiziente Schmelzöfen sollten bis zu 80% der Betriebszeit Metall aufschmelzen. Im Betrieb werden im Durchschnitt 40% erreicht. Würde die Auslastung aller Öfen um 25% erhöht, würde diese einer Effizienzsteigerung von 1'200 MWh/a entsprechen.

PVS haben zwar einen sehr hohen Energiebedarf, finden jedoch in der Energiebilanz der Schmelzbetriebe typischerweise eher wenig Beachtung. Im Betrieb sind sie immerhin für 15% des Erdgasbedarfs verantwortlich. Sie sollten auf den neusten Stand der Technik gebracht werden. Heute werden PVS mit extrem effizienten und qualitativ besseren Porobrennern angeboten. Energieeinsparungen von 50% sind die Regel, 70% sind schon vorgekommen. Im Betrieb wäre dies 500-800 MWh/a Erdgas.

Die Heizungsanlage im Betrieb verbraucht sehr viel Energie. Im Werk sollten daher die Heizkurven der Anlage besser eingestellt werden. Der optimale Betriebspunkt, d.h. behagliches Raumklima bei möglichst tiefen Vorlauftemperaturen, muss schrittweise über eine Saison gefunden werden. Ausserdem wäre es wichtig für den Betrieb (mindestens) einen Energie- oder Gaszähler bei den Heizungsanlagen einzubauen. Nur so kann die dynamische Energiebilanz der Anlage bewertet werden.

Für die Heizungsanlage werden bereits heute Wärmerückgewinnungen (WRG) bei der Druckluft und einem Schmelzofen betrieben. Die Druckluft-WRG funktionieren sehr gut und sollten möglichst noch ausgebaut werden. Daraus könnten Energieeinsparungen von mindestens 250 MWh/a resultieren.

Die bereits installierte WRG am Schmelzofen 2x3 funktioniert heute nicht richtig bzw. wurde wahrscheinlich zu klein dimensioniert. Sie liefert höchstens 50% der möglichen Rauchgas-WRG. Sie sollte auf jeden Fall optimiert werden. Die restlichen Öfen sind für eine interne WRG bei heutigem Betrieb klar nicht wirtschaftlich.

Im Rahmen dieses Projektes wurde auch geprüft, ob der Betrieb sinnvollerweise Energie mittels Fernwärme abgeben kann. Die Wärmeleistung der Rauchgase liegt für eine warme Fernwärme im Durchschnitt bei 190 kW bzw. für eine kalte Fernwärme bei 250 kW. Eine reine Fernwärme könnte für den Betrieb nur interessant sein, wenn ein Wärmebezüger das ganze Jahr (min. 6'000 h) Wärme benötigen würde. In diesem Fall könnte bei einer warmen Fernwärme 1'100 MWh/a bzw. einer kalten Fernwärme 1'500 MWh/a durch die Rauchgase abgegeben werden.

Für ein externes Energienetz wäre es auch interessant, die Rückkühlung der Druckgussmaschinen über ein solches Netz zu betreiben. Das Energienetz würde somit Fernkälte an den Betrieb liefern. Der Betrieb könnte so bei ganzjähriger Laufzeit ca. 5'000-6'000 MWh rückgekühlte Energie abgeben. Könnten zusätzlich zur Rückkühlung die Rauchgase abgekühlt werden, würde sich der Wert auf bis zu 5'500-6'500 MWh/a erhöhen.

Im vorliegenden Projekt waren keine detaillierten Daten der Rückkühlanlagen bekannt. Die genannten Werte sind Hochrechnungen und sind erst als Richtwerte zu verstehen. Genaue Daten zu den Energiemengen müssen mittels Messung geprüft und validiert werden. Ausserdem waren im Projekt keine Daten zu potenziellen Wärmebezügern ausserhalb des Betriebs bekannt.

Als letzte Priorität zur Abwärmenutzung wurde im Projekt eine ORC-Anlage geprüft. Die Abwärmeleistungen im Betrieb sind bei weitem zu klein, um eine ORC-Anlage zu rechtfertigen. Es kann kein guter Kosten-Nutzen resultieren.

In einem weiteren Schritt im Projekt wurde mit der Firma Climeworks, ein ETH Start-up, das mit einem Prozess CO<sub>2</sub> aus der Luft extrahiert, Kontakt aufgenommen. Eine Climeworks-Anlage könnte entweder CO<sub>2</sub> an Dritte, z.B. Treibhäuser oder Getränkehersteller, oder "Power-to-Gas"-Betreiber (P2G) liefern. Eine grosse Anlage (1'000 t CO<sub>2</sub>/a) wäre technisch, auf Grund der Wärmeleistung, eher schwierig umzusetzen. Aus wirtschaftlicher Sicht müsste die Anlage als Prototyp verstanden werden. Die Investitionen könnten bei weitem nicht wirtschaftlich gerechtfertigt werden. Eine Zusammenarbeit mit den St.Galler Stadtwerken (SGSW) und dem Bundesamt für Energie (BFE) wäre zwingend erforderlich.

Würde der Betrieb heute alle sinnvollen Optimierungs- und internen WRG-Massnahmen umsetzen, könnte sie, auf den heutigen Metall-Durchsatz bezogen, 2'000 MWh/a oder 15% Erdgas einsparen.

Bei den Stromverbrauchern wird empfohlen mit möglichst effizienten Motoren zu arbeiten und wenn möglich und sinnvoll, auf frequenzgesteuerte Motoren zu achten (z.B. bei den Rückkühlanlagen).

Es ist zu beachten, dass auch Massnahmen mit einem hohen (statischen) Payback dynamisch gerechnet, sehr wirtschaftlich sein können und somit nicht einfach ausser Acht gelassen werden sollten.

Die vorliegende Pinch-Analyse wurde vom BFE, den SGSW und vom Kanton St.Gallen (AFU) finanziell unterstützt. An dieser Stelle möchten wir diese Unterstützung verdanken.

Der vorliegende Bericht ist in partieller Zusammenarbeit mit Dr. Thomas Bürki GmbH, Benglen, entstanden. Auch diese Zusammenarbeit möchten wir an dieser Stelle danken.

# 1. Ausgangslage

## 1.1 Allgemein

Der Betrieb ist ein international tätiges Unternehmen, das sich auf die Verarbeitung von Aluminium-, Magnesium- und Zink-Druckguss spezialisiert hat.

Die technischen Installationen und die zugehörige technische Infrastruktur des Unternehmens sind teilweise über Jahrzehnte gewachsen. Die Erarbeitung der Grundlagen und einer energetischen Übersicht der thermischen Prozesse und Heizungsanlagen war daher aufwändig. Es mussten zum Teil Prinzipschemata der Anlagen erarbeitet werden. Diese dienten als Grundlage für Messungen, Berechnungen und Annahmen für die Energieflüsse bzw. die Energieverteilung auf dem Areal. Abbildung 1 zeigt das Energiefluss-Diagramm des Werks.

## 1.2 Energiesituation

Das Werk hat einen sehr grossen Energieverbrauch in Form von Erdgas, Heizöl und Strom (Abbildung 1). Im Jahr 2012 wurden rund 13.6 GWh Erdgas und 93 MWh Heizöl für thermische Prozesse und Heizungen benötigt. Die Beheizung der Prozessanlagen (hauptsächlich der Schmelzöfen) benötigt einen grossen Teil dieser Energie. Im Jahr 2012 wurden ca. 7.8 GWh oder 54% der fossilen Energie alleine für den Schmelzbetrieb benötigt. Weitere 2.9 GWh oder 20 % wurden für Wärmebehandlung und Pfannenvorwärmstationen (PVS) benötigt. Die Heizungsanlagen benötigten 2 GWh/a oder erhebliche 14% der Energie.

Die thermischen Prozessanlagen werden von Montag bis Freitag dreischichtig und an jedem zweiten Samstag einschichtig betrieben. Bei 49 Wochen Betriebszeit entspricht dies im Durchschnitt 759 Schichten bei 6'070 h pro Jahr.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die betrachteten thermischen Anlagen.

Der Strombedarf im Betrieb beläuft sich auf rund 20.7 GWh/a. Davon benötigen die Druckgussmaschinen rund 14.5 GWh/a oder 51%, die Wärmebehandlung 1.7 GWh/a oder 8% und die restlichen Verbraucher 4.5 GWh/a oder 22%, wovon die Druckluft etwa 1 GWh/a (5%) ausmacht.

Im heutigen Energiesystem sind bereits WRG-Anlagen installiert. Der grösste Anteil kommt von den Druckluftanlagen mit ca. 500 MWh/a. Weitere 70 MWh/a kommen von der Rauchgas-WRG des Schmelzofens. Die bestehenden WRG-Anlagen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

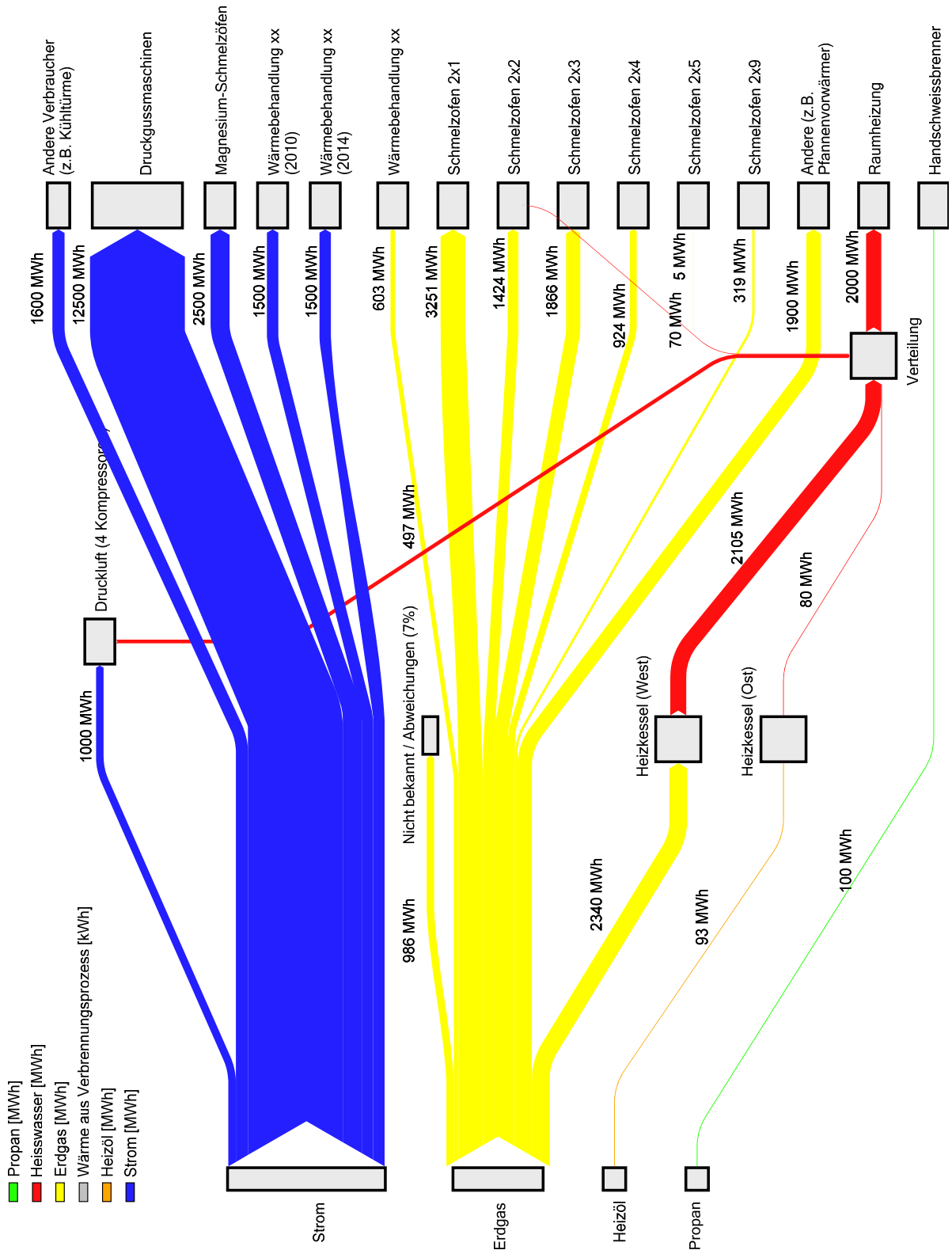


Abbildung 1: Energiefluss-Diagramm ganzes Werk

<b>Anlage</b>	<b>Typ</b>	<b>Energieträger</b>	<b>Energiebedarf 2012 [MWh/a]</b>	<b>Vollbetriebszeit [h]</b>
2x1	Schmelzofen	Erdgas	1'424	6'070
2x2	Schmelzofen	Erdgas	3'251	6'070
2x3	Schmelzofen	Erdgas	1'866	6'070
2x4	Schmelzofen	Erdgas	924	6'070
2x5	Schmelzofen	Erdgas	319	6'070
xx	Wärmebehandlung	Erdgas	604	6'070
Heizung	Betriebsheizung	Heizöl	93	2'000
Heizung	Betriebsheizung	Erdgas	2'806	2'000
5x	Pfannenvorwärmstation	Erdgas	2'396	k.A.
xx	Wärmebehandlung	Strom	720 (Annahme)	6'070
xx	Wärmebehandlung	Strom	990 (Annahme)	6'070

Tabelle 1: Untersuchte thermische Anlagen und Prozesse

<b>Anlage</b>	<b>WRG-Typ</b>	<b>Leistung (el. Nennleistung/ installierte Leistung) [kW]</b>	<b>Energiemenge 2012 [MWh/a]</b>	<b>Betriebszeit (Annahme) [h]</b>
Heizung Ost	Druckluftkompressor	90	284	4'500
Heizung West	Druckluftkompressor	110	213	3'000
Heizung West	Schmelzofen Rauchgas-WRG	145	70	2'500

Tabelle 2: Bestehende WRG-Anlagen im Werk

## 2. Thermische Prozesse

### 2.1 Schmelzöfen

#### Kennwerte

In den Schmelzöfen werden die für das Druckgiessen verwendeten Metall-Legierungen geschmolzen. Abbildung 2 zeigt beispielhaft den kippbaren Schachtschmelzofen 2x1<sup>1</sup>, den modernsten Ofen im Werk. Im Betrieb sind sechs (mittelgrosse) Schmelzöfen installiert. Der Schmelzofen 2x9 ist nur sehr selten in Betrieb. Sein Energiebedarf ist daher verschwindend klein.

Die Schmelzöfen mit den Legierungen 2x5 und 2x4 sind ebenfalls sporadisch in Betrieb. Trotzdem benötigen Sie mit 319 MWh/a bzw. 924 MWh/a beachtliche Mengen an Energie. Die Aluminium-Schmelzöfen mit den Legierungen 2x1 und 226 werden dauernd betrieben. Dabei pendeln die Öfen zwischen Schmelz- und Warmhaltebetrieb: Es sind typischerweise zwei Brenner mit je zwei Stufen installiert, d.h. ein Warmhaltebrenner und ein Schmelzbrenner. Im Schmelzbetrieb wird gezielt Metall aufgeschmolzen. Das Metall wird

<sup>1</sup> Die Nummer des Schmelzofens, z.B. 2xx usw. gibt Hinweis über Zusammensetzung der Metalllegierung.



zuerst auf den Schmelzpunkt gebracht, dann geschmolzen und zusätzlich etwas überhört (ca. 80 K). Der Schmelzpunkt von Aluminium liegt bei 660°C, von Zink bei 450°C und Magnesium bei 650°C.

Es ist zu beachten, dass in den Öfen im Betrieb hauptsächlich Aluminium (Anteil 55%) und in Zukunft auch Magnesium (Anteil 45%) geschmolzen wird. Die Zink-Schmelzerei wird komplett eingestellt.

Da die Schmelzöfen über 55% der fossilen Energie im Werk benötigen, bilden sie den "grossen Hebel", um die Energieeffizienz zu steigern. Die Öfen müssen daher möglichst effizient betrieben werden. Dazu gibt es branchenspezifische Kennwerte<sup>2</sup>:

- Auslastung des Ofens, d.h. wieviel Metall wird geschmolzen im Verhältnis zur theoretischen Schmelzleistung<sup>3</sup> des Ofens
- Spezifische Schmelzenergie (effektiv), d.h. aufgewendete Energiemenge pro Tonne geschmolzenes Metall
- Wirkungsgrad des Ofens, d.h. das Verhältnis der theoretischen zur effektiven spezifischen Schmelzenergie für die Metallschmelze<sup>4</sup>

#### Auslastung und Wirkungsgrad

Vom Durchsatz an Metall pro Schmelzofen sind vom Betrieb die Anzahl gefüllten Pfannen à 700 kg Schmelze pro Schicht bekannt. Dieser Wert unterliegt, je nach Nachfrage an Metall, starken Schwankungen von bis zu (+/-) 20%. Mit der Anzahl Schichten (759 Schichten/a) können Durchschnittswerte für die Auslastung, spez. Schmelzenergie und den Wirkungsgrad gebildet werden. Die Kennwerte für den Betrieb sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Der Ofen mit der Legierung 2x5 ist nur sehr selten in Betrieb. Aus diesem Grund sind keine Daten für Kennwerte vorhanden. Seine Auslastung kann aber mit 5-10% angenommen werden.

---

<sup>2</sup> Bayr. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), Effiziente Energieverwendung in der Industrie - Teilprojekt "Metallschmelzbetriebe" Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben, Augsburg, 2005

<sup>3</sup> Angaben aus E-Mail-Verkehr mit Rudolf Hillen, StrikoWestofen GmbH

<sup>4</sup> Zur Ermittlung der (theoretischen) spezifischen Schmelzenergie von Aluminium müssen drei Stufen unterschieden werden: Aufwärmen des Metalls von der Raumtemperatur (20°C) bis zum Schmelzpunkt (660°C) (spez. Wärmekapazität  $c_{pAl} = 897 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ), Schmelzen des Aluminiums (Schmelzwärme  $r_{Al} = 398 \text{ kJ/kg}$ ) und Überhitzen des Materials von 660°C auf 740°C (Annahme: spez. Wärmekapazität  $c_{pAl} \approx 897 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ).

Um eine Tonne Aluminium bei Raumtemperatur aufzuwärmen, zu schmelzen und zu überhitzen sind somit rund 300 kWh Energie notwendig.

Anlage	Durchsatz [t/a]	Auslastung [%]	Spez. Schmelz- energie [kWh <sub>th</sub> /t]	Wirkungsgrad [%]
2x1	4'055	38	816	37
2x2	1'746	33	802	37
2x3	3'011	50	620	48
2x4	339	6	2'723	11

Tabelle 3: Durchschnittliche Kennwerte der Schmelzöfen (Abweichung +/- 20%)

Der Ofen 2x4 ist ebenfalls nur sporadisch in Betrieb. In diesem Ofen werden Legierungen geschmolzen, die nur selten und in Kleinserien verwendet werden. Dies erklärt die tiefe Auslastung von 6% im Verhältnis zur effektiven Schmelzleistung des Ofens. Die restlichen Öfen mit Aluminium-Legierungen weisen Auslastungen zwischen 33% und 50% auf.

Ein sehr gut ausgelasteter Ofen weist in der Industrie eine möglichst konstante Auslastung von 70-80% auf<sup>5</sup>. Auf Grund der starken Schwankungen kommen im Betrieb Auslastungen von gegen 70% vor, z.B. beim Ofen 2x3. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass solch hohe Werte eher die Ausnahme als die Regel darstellen.

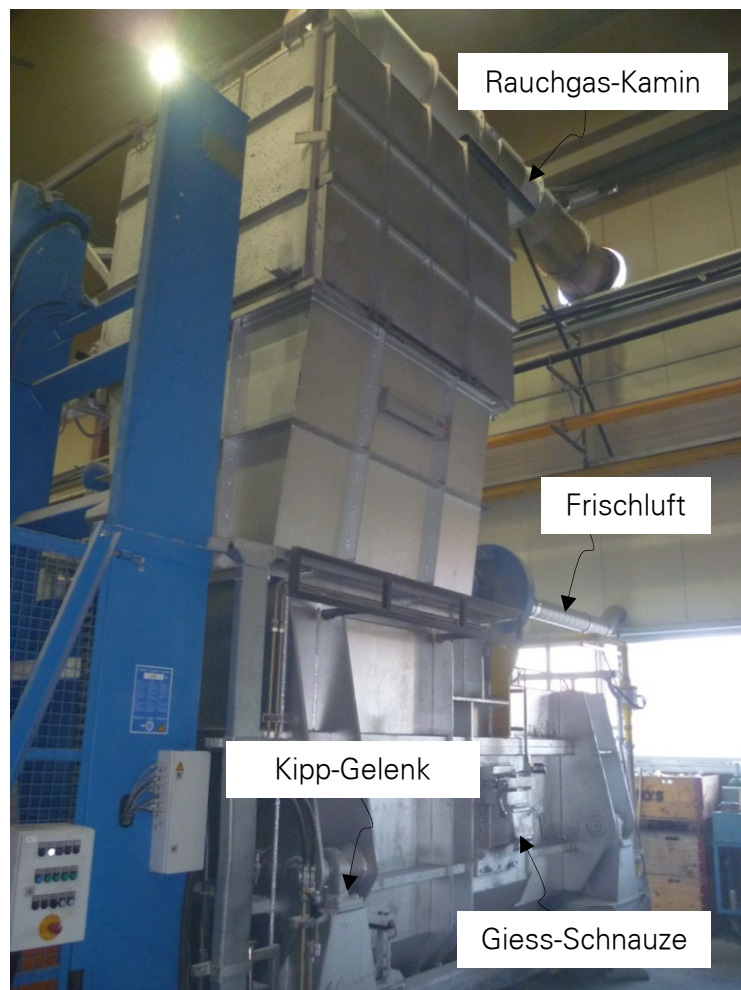


Abbildung 2: Schmelzöfen 2x1 (Baujahr 2010)

Das Problem einer tiefen Schmelzofen-Auslastung ist, dass die Brenner lange Zeit im Warmhaltebetrieb arbeiten. Das flüssige Schmelzgut wird flüssig gehalten, damit es bei Bedarf den Druckguss-Maschinen zugeführt werden kann. Die zugeführte Energie kommt also nicht direkt dem thermischen Prozess (aufwärmen, schmelzen, überhitzen von Metall) zu Gute. Die Energie verhindert vielmehr das Erstarren der Schmelze.

In der Literatur<sup>5</sup> wird angegeben, dass mit verdoppelter Auslastung der spezifische Energiebedarf für den Ofen um ca. 36% reduziert wird. Im Betrieb entsprechen 36% Energieeinsparung bei den Schmelzöfen rund 2'800 MWh/a oder 20% des gesamten Erdgasbedarfes. Würde die Auslastung, und somit der Metalldurchsatz, im Betrieb zukünftig um 25% erhöht, würde dies einer Energieeffizienz-Steigerung von etwa 1'200 MWh/a Erdgas entsprechen.

Die spezifische Schmelzenergie der Öfen im Betrieb liegt zwischen 600 kWh<sub>th</sub>/t und 800 kWh<sub>th</sub>/t. Typische Werte für Schachtschmelzöfen liegen bei 580-900 kWh<sub>th</sub>/t<sup>6</sup>. Daraus lässt sich folgern, dass die spezifische Schmelzenergie der Öfen eine gute Bandbreite aufweist. Bezieht man die effektive Schmelzenergie auf die Theoretische, lässt sich der Wirkungsgrad des Ofens ermitteln. Im Betrieb liegen die Wirkungsgrade bei rund 40-50%.

Gute Schachtschmelzöfen lassen Wirkungsgrade von über 50% zu<sup>7</sup>. Dazu zeigt Abbildung 3 beispielhaft das Energiefluss-Diagramm des Schachtschmelzofens 2x1. Es ist ersichtlich, dass der Ofen Wärmeverluste von 1'320 MWh/a, hauptsächlich durch Warmhaltebetrieb bzw. tiefe Auslastung, aufweist. Diese entsprechen in etwa der (theoretisch) notwendigen Nutzwärme für den Schmelzbetrieb. Es ist zudem ersichtlich, dass ca. 300 MWh/a der Energie der (800°C heissen) Rauchgase intern zirkuliert bzw. zur Vorwärmung der Aluminium-Barren verwendet wird.

Das Energiefluss-Diagramm widerspiegelt den Wirkungsgrad des Ofens von ca. 40% und vor allem die tiefe Auslastung. Die detaillierte Analyse der internen WRG ist in Kapitel 3 aufgezeigt.

Im Betrieb kann davon ausgegangen werden, dass sich die Wirkungsgrade in einem mittleren bis guten Spektrum befinden. Jedoch lässt sich beim Vergleich der Zahlen darauf schliessen, dass gegen oben noch Verbesserungen möglich sind. Es sollten daher nachfolgend aufgelistete Standard-Massnahmen zur Effizienzsteigerung geprüft werden.

#### Standard-Massnahmen Energieeffizienz

Folgende Standard-Massnahmen bei Schachtschmelzöfen sollten geprüft werden<sup>8</sup>:

- Befüllungsgrad des Ofenschachts: Ein hoher und gleichmässiger Befüllungsgrad des Schachts führt zu einer hohen Abwärmenutzung im Schacht (Schachtlaser oder Schacht-Erhöhung prüfen)

---

<sup>5</sup> Bayr. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (2005), Effiziente Energieverwendung in der Industrie - Teilprojekt "Metallschmelzbetriebe" Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben, Augsburg

<sup>6</sup> Bayr. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (2005), Effiziente Energieverwendung in der Industrie - Teilprojekt "Metallschmelzbetriebe" Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben, Augsburg

<sup>7</sup> Malpohl, K. & Hillen, R. (2009), Aluminium-Schmelzöfen für die Druckgiesserei, Druckguss

<sup>8</sup> Angaben aus E-Mail-Verkehr mit Rudolf Hillen, StrikoWestofen GmbH

- Schachtabdeckung für Warmhaltebetrieb und/oder Freischmelzbetrieb: Reduktion Energiebedarf im Warmhaltebetrieb
- Ofendruck-Regelung installieren (nur bei Abgas-Absauganlagen sinnvoll)
- Automatische Abdeckung der Giessschnauze (nur bei kippbaren Öfen)
- Minimierung von Chargierverlusten: Füllstand der Beschickungsbehälter überprüfen, da häufiges Chargieren die Wärmeverluste erhöht.

### Rauchgase bei heutiger Auslastung

Die Rauchgastemperatur der Schmelzöfen liegt zwischen 150°C und 450°C, abhängig ob Schmelz- oder Warmhaltebetrieb gefahren wird. Die mittleren Rauchgastemperaturen liegen, je nach Ofen, zwischen rund 200°C und 280°C. Im Vergleich zur notwendigen Schmelzbadtemperatur von 740°C sind dies tiefe Werte. Der Grund dafür liegt bei der internen Abgas-Rekuperation im Ofenschacht<sup>7</sup>. Das heisst, die hohe Temperatur der Rauchgase nach dem Schmelzschacht (mittlere Temperatur ca. 650°C) wird verwendet, um das Rohmaterial (typischerweise Aluminiumbarren) vorzuwärmen.

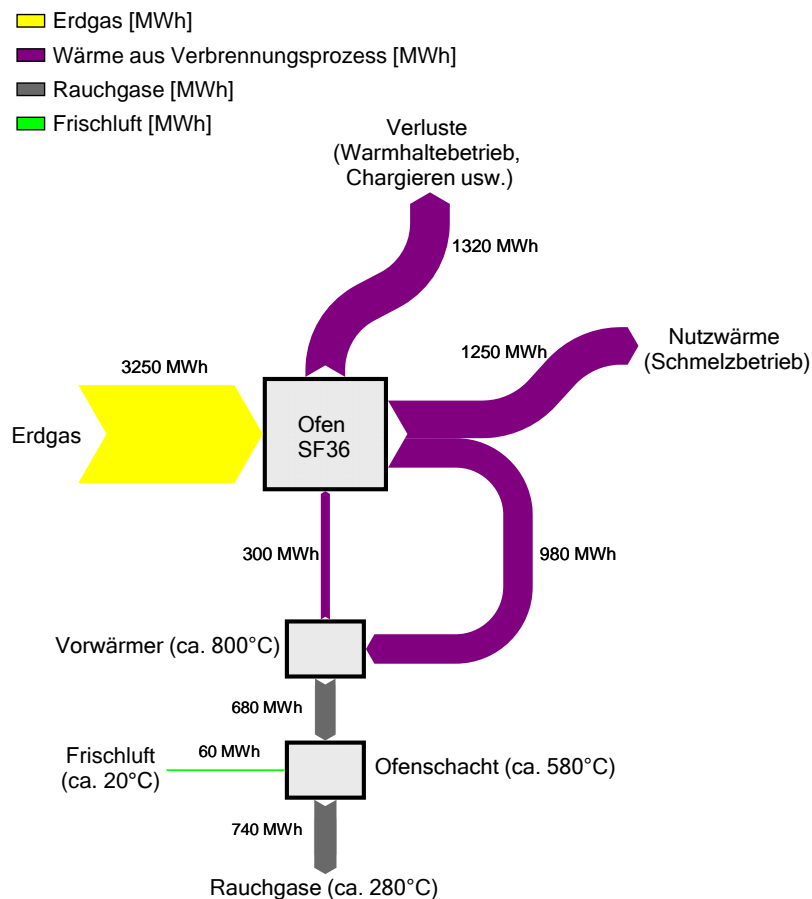


Abbildung 3: Energieflussdiagramm Schmelzöfen 2x1 (Durchsatz 4'000 t/a, Auslastung +/- 40%)

Zudem deuten die tiefen Rauchgastemperaturen auf einen hohen Restsauerstoffanteil im Rauchgas hin, d.h. es wird viel Falschluff angesaugt. Messungen der Feuerungskontrolle

(2012) zeigen bei den Rauchgasen der Schmelzöfen sehr hohe Luftverhältnisse<sup>9</sup> (am Kaminausgang). Abbildung 4 zeigt dazu beispielhaft das Verbrennungsdreieck nach Oswald<sup>10</sup> für den Schmelzofen 2x1.

Typische Werte bei Gasfeuerungen liegen bei einem Luftverhältnis von 1.1, d.h. ein Restsauerstoffanteil in den Rauchgasen von 2% (vgl. Abbildung 4). Als Vergleich zeigt der Ofen 2x1 bei einem Restsauerstoffgehalt ( $O_2$ ) im Abgas von 15.2% und einem Kohlendioxidgehalt ( $CO_2$ ) von 3.3% bei vollständiger Verbrennung (d.h.  $CO \approx 0$ ) ein Luftverhältnis von 3.5.

Das Luftverhältnis der Schmelzöfen ist eine sehr wichtige Grösse, um das Potenzial für eine Rauchgas-WRG abzuschätzen. Hohe Werte ergeben grosse Rauchgasmengen, dafür aber "tiefe" Rauchgastemperaturen.

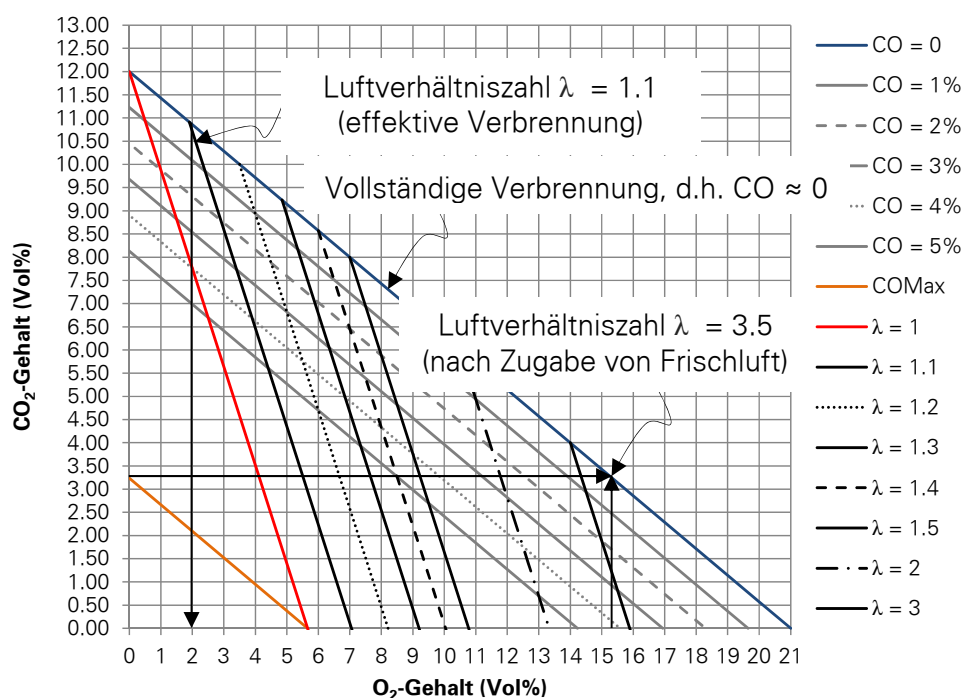


Abbildung 4: Verbrennungsdreieck nach Oswald für Erdgas, Schmelzofen 2x1

Tabelle 4 zeigt die mögliche Wärmeleistung aus den Rauchgasen<sup>11</sup> bei durchschnittlicher Brennerleistung im heutigen Betriebszustand.

<sup>9</sup> Eine Feuerung benötigt für eine vollständige Verbrennung (d.h. kein Kohlenmonoxid) mehr Luft, als für die Verbrennung (stöchiometrisch) notwendig wäre. Das Verhältnis von effektiver Luftmenge zur theoretischen Luftmenge nennt man Luftverhältnis bzw. Luftverhältniszahl (auch Luftzahl).

<sup>10</sup> Das Verbrennungsdreieck nach Oswald zeigt brennstoffabhängig die Zusammenhänge von Kohlendioxidgehalt ( $CO_2$ ), Sauerstoffgehalt ( $O_2$ ) und Kohlenmonoxid Gehalt ( $CO$ ) in den Rauchgasen. Davon abgeleitet lässt sich die Luftverhältniszahl  $\lambda$  ermitteln.

<sup>11</sup> Die Werte sind als Hochrechnung zu verstehen. Die Auslastung und somit die Brennerleistung der Öfen weist starke Schwankungen auf. Für detaillierte Angaben müssen die Werte gemessen und validiert werden.

<b>Anlage Auslastung</b>	<b>Mittlere Leistung (Brenner)</b>	<b>Luftverhältniszahl <math>\lambda</math></b>	<b>Rauchgas-Massenstrom</b>	<b>Mittlere Rauchgas-Temperatur</b>	<b>Theoretische Wärmeleistung</b>	
<b>[%]</b>	<b>[kW]</b>	<b>[-]</b>	<b>[kg<sub>tr</sub>/h]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[kW]</b>	
2x1	38+/-19	570	3.5	1'520	280	122
226	33+/-17	250	4	840	200	53
2x3	50+/-17	380	4	1'280	200	81
2x4	6+/-5	210	4	670	220	42

Tabelle 4: Durchschnittliche Wärmeleistung der Schmelzofen-Rauchgase, Luftverhältnis = 3.5-4

In der Summe kann aus den Rauchgasen, bei heutiger Auslastung, eine mittlere, theoretische Wärmeleistung von 300 kW gewonnen werden. Die Schmelzofen sind 6'070 h/a in Betrieb. Aus den Rauchgasen kann somit eine theoretische Wärmeenergie von 1'820 MWh/a genutzt werden.

#### Schonung der Rauchgasanlage

Luftverhältniszahlen von 3-4 sind gemäss Hersteller, StrikoWestofen<sup>12</sup>, typisch für Schachtschmelzöfen. Diese erzeugen im Kamin einen Unterdruck und saugen über Frischluftöffnungen entsprechend viel Luft in den Kamin an. Die hohen Luftverhältnisse ergeben sich also erst nach dem Schmelzvorgang und haben auf den Wirkungsgrad des Ofens keinen Einfluss. Sie sollen helfen, den Ofenschacht und Kamin zu schonen und die Rauchgase abzuführen.

Mit StrikoWestofen wurde diese (fragliche) Schonung des Kamins intensiv diskutiert. Der hohe Falschluffstrom soll vor allem einzelne Teile des Ofenschachtes und der darauf "aufgesetzten" Ofenhaube schonen. Ausserdem enthält die Ofenhaube eine Revisionstüre, die auf eine Rauchgastemperatur von max. ca. 350°C beschränkt ist. Um die Schmelzöfen durchgängig mit Temperaturen bis zu 600°C zu betreiben, müsste der Luftspalt verkleinert und die Revisionstüre ersetzt werden. Für den Umbau eines Ofens müssen gemäss StrikoWestofen ca. 15'000 CHF aufgewendet werden. Tabelle 5 zeigt die mögliche Wärmeleistung aus den Rauchgasen, wenn alle Öfen Rauchgastemperaturen von 500°C aufweisen würden. Es wird davon ausgegangen, dass in diesem Fall nur wenig Luft zusätzlich in die Ofenhaube angesaugt werden müsste, d.h. das Luftverhältnis wird mit 1.5 angenommen.

<b>Anlage Auslastung</b>	<b>Mittlere Leistung (Brenner)</b>	<b>Luftverhältniszahl</b>	<b>Rauchgas-Volumenstrom</b>	<b>Rauchgas-Temperatur</b>	<b>Theoretische Wärmeleistung</b>	
<b>[%]</b>	<b>[kW]</b>	<b>[-]</b>	<b>[kg<sub>tr</sub>/h]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[kW]</b>	
2x1	38+/-19	570	1.5	828	500	121
226	33+/-17	250	1.5	363	500	52
2x3	50+/-17	380	1.5	552	500	80
2x4	6+/-5	210	1.5	305	500	44

Tabelle 5: Durchschnittliche Wärmeleistung der Schmelzofen-Rauchgase, Luftverhältnis = 1.5

<sup>12</sup> Angaben aus E-Mail-Verkehr mit Rudolf Hillen, StrikoWestofen GmbH

Aus Tabelle 5 kann entnommen werden, dass die Wärmeleistung bei einer Rauchgastemperatur von 500°C (Luftverhältnis = 1.5) ebenfalls ca. 300 kW beträgt. Die Erhöhung der Rauchgastemperatur zeigt also keinen frappanten Einfluss auf die Wärmeleistung der Rauchgase. Dies ist vor allem auf das stark reduzierte Luftverhältnis zurückzuführen.

### Rauchgase bei optimaler Auslastung

Sehr gut ausgelastete Schmelzöfen zeigen Auslastungen von 70-80%<sup>13</sup>. Mit steigender Auslastung sind auch die Schmelzbrenner öfter in Betrieb, d.h. die durchschnittliche Brennerleistung, die Rauchgastemperatur und der Rauchgasmassenstrom steigen an. Das WRG-Potenzial kann erheblich gesteigert werden. Tabelle 6 zeigt beispielhaft die durchschnittliche Wärmeleistung der Schmelzofen-Rauchgase bei einer angenommenen Auslastung von 80%. Dabei wird angenommen, dass mit der erhöhten Auslastung die durchschnittliche Brennerleistungen, der Rauchgasmassenstrom und die Rauchgastemperatur um 30% ansteigen.

<b>Anlage</b>	<b>Auslastung</b>	<b>Mittlere Leistung (Brenner)</b>	<b>Luftverhältniszahl</b>	<b>Rauchgas-Volumenstrom</b>	<b>Rauchgas-Temperatur</b>	<b>Theoretische Wärmeleistung</b>
	<b>[%]</b>	<b>[kW]</b>	<b>[-]</b>	<b>[kg<sub>tr</sub>/h]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[kW]</b>
2x1	80	740	3.5	1'890	360	190
226	80	325	4	1'024	260	75
2x3	80	495	4	1'560	260	115
2x4	80	275	4	882	290	75

Tabelle 7: Durchschnittliche Wärmeleistung der Schmelzofen-Rauchgase (optimierte Situation mit 80% Auslastung und Luftverhältnis = 3.5-4)

Die theoretische Wärmeleistung würde sich mit höherer Auslastung und Rauchgastemperatur zu 455 kW summieren. Gegenüber der heutigen Situation (300 kW) ist das ein Plus von gegen 50%. Die theoretische Wärmeenergie bei 6'070 h/a entspricht 2'700 MWh/a.

Die Betrachtung des optimalen Betriebs betont nochmals auf eindrückliche Weise die Wichtigkeit einer guten Auslastung der Schmelzöfen.

## **2.2 Pfannenvorwärmstationen**

Jeder Schmelzofen verfügt über so genannte PVS. Die grossen Giesspfannen werden von diesen Stationen auf die gewünschte Transport-Temperatur gebracht, damit die Pfannen mit flüssigem Metall beschickt werden können.

Der Energiebedarf für die PVS ist mit ca. 1'900 MWh/a (Schätzung in Zusammenarbeit mit dem Betrieb) sehr gross. Wenn die Pfannen mit 700 kg Inhalt nicht gerade für den Transport verwendet werden, sind sie an die PVS angeschlossen und werden warm gehalten auf ca. 500°C.

<sup>13</sup> Bayr. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (2005), Effiziente Energieverwendung in der Industrie - Teilprojekt "Metallschmelzbetriebe" Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben, Augsburg

Bei den PVS muss auf möglichst effiziente Anlagen geachtet werden. Die kleineren Stationen im Betrieb sind rund 20 Jahre alt. Es sollte überprüft werden, ob diese durch effizientere Anlagen ersetzt werden können.

Die Firma "promeos" bietet eine neuartige Technologie mit flammfreien Porenbrennern an (aus Hochtemperatur-Keramik gefertigt). Sie nennt mögliche Energieeinsparungen von mindestens 50% (Kunden berichten auch von Einsparungen von 70%)<sup>14</sup>.



Abbildung 5: Pfannenvorwärmstation im Betrieb

### 2.3 Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlungsanlagen im Betrieb funktionieren nach dem Prinzip eines Backofens. Fertige Teile aus den Druckguss-Maschinen werden in Mehrkammeröfen (sechs Kammern) wärmebehandelt. Dazu werden die Teile in den ersten drei Kammern des Ofens mittels Heissgasventilatoren auf 450-470°C gebracht. Anschliessend wird das Metall mittels Aussenluftstrom in einer separaten Kammer abgeschreckt.

Im Betrieb wurden Luftvolumenströme von ca. 40'000 m<sup>3</sup>/h gemessen, die nach der Abschreckkammer mit 40-70°C (schwankende Temperatur) wieder nach draussen geführt werden. Nachher kommen drei Kammern mit 160-250°C als letzte Stufe der Wärmebehandlung (Abbildung 6).

Die Wärmebehandlungsanlagen im Betrieb werden mit Erdgas (1 Anlage) und Strom (2 Anlagen) betrieben. Der Energieaufwand für Erdgas betrug im Jahr 2012 rund 600 MWh bzw. für Strom 1'700 MWh.

Als bereits realisierte Massnahme zur WRG kann bei einer Anlage (xx 2010) der warme Luftstrom, anstatt direkt nach draussen, in den Raum eingeblasen werden. Die Umstellung muss jedoch manuell (auf 6 m Höhe) erfolgen.

Es ist zu beachten, dass das Klima in den Hallen durch Abwärme von Schmelzöfen und Maschinen eher zu warm, als zu kalt ist. Die Betriebszeit der WRG wird sich auf einige Stunden im Jahr beschränken.

<sup>14</sup> Angaben aus Telefongespräch mit Dr. Jochen Volkert, Geschäftsführer der promeos GmbH



Es ist technisch aber auch wirtschaftlich schwierig die Wärmebehandlung energetisch zu optimieren. Jegliche Massnahme zur Optimierung greift direkt in die Prozesse ein und ist entsprechend aufwändig umzusetzen. Bei der gasbefeuerten Anlage (xx) wäre es denkbar den ersten (grössten) Brenner (230 kW) durch einen Rekuperations-Brenner auszutauschen<sup>15</sup>. Diese nutzen die heissen Abgase direkt intern, um Frischluft und Gas vorzuwärmen. Die Umrüstung auf Rekuperations-Brenner beschränkt sich jedoch auf den ersten Brenner, da nur dieser regelmässig, wenn auch für kurze Zeit, mit voller Leistung betrieben wird. Die restlichen Brenner werden nur bei Bedarf im Teillastfall betrieben. Ein Ersatz würde sich nicht lohnen. Der Ersatz des ersten Brenners würde maximal 10% bzw. 60 MWh/a Energie einsparen.

Eine weitere Möglichkeit, die von xx schon eingesetzt wurde<sup>14</sup>, wäre die Frischluftvorwärmung mittels Rauchgas-WRG. Dabei wird eine Rohr-in-Rohr-Kaminanlage installiert, welche die Rauchgase bzw. die Frischluft im Gegenstrom zueinander führt. Eine Einsparung von 50 MWh/a wäre möglich.

Die elektrisch beheizten Öfen verwenden keinen Frischluftstrom. Sie können nicht mittels WRG optimiert werden.

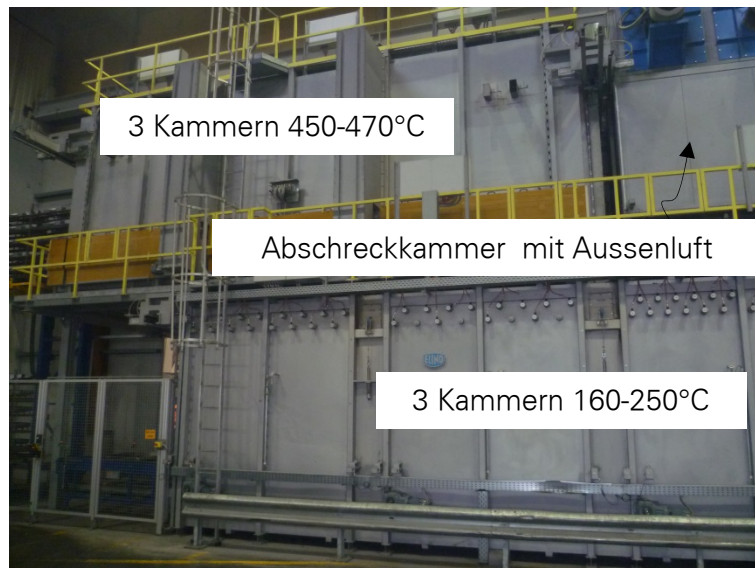


Abbildung 6: Wärmebehandlung xx (Baujahr 2010)

## 2.4 Maschinenkühlung

Die Druckgussmaschinen im Betrieb bzw. die grossen Werkzeuge der Maschinen müssen beheizt und gekühlt werden. Dazu werden so genannte Temperiergeräte (auch Heiz-Kühl-Aggregate genannt) verwendet. Das Ziel der "Klimatisierung" der Geräte ist eine möglichst zweckoptimierte Temperaturverteilung im Gussteil beim Entformen. Dies ist massgebend für eine hohe Druckgussqualität<sup>16</sup>.

<sup>15</sup> Angaben aus Telefongespräch mit Adolf Hanus, xx Thermprocess GmbH

<sup>16</sup> Rockenschaub, H, et al. (2007), Temperaturregulierung von Druckgiessformen für Aluminium-Druckguss, Giesserei-Rundschau 54

Während eines Druckgiessvorgangs muss von den Werkzeugen genau so viel Energie abgeführt werden, wie durch die Schmelze, d.h. durch Erstarren und Abkühlen, freigegeben wird. Die Temperiergeräte sind mittels Thermoöl-Kreislauf an die Druckguss-Werkzeuge angeschlossen.

Im Betrieb wird ein Kühlsystem, das nach dem Prinzip der Verdunstungskühlung arbeitet, verwendet. Dieses bezieht Wasser aus einem warmen Becken (24 °C) und gibt dieses zurück in ein kaltes Becken (22.5 °C). Abbildung 17 im Anhang A.1 zeigt ein vereinfachtes Prinzipschema der heutigen Anlage. Das kalte Becken stellt Wasser für die Zuleitung zu den Maschinen bereit, während das warme Becken den Zulauf für die Verdunstungskühler darstellt. Wenn die Maschinen den Kühlbedarf begrenzen, sind die zwei Becken mittels Überströmvorrichtung (Öffnung im Becken) verbunden. Auf diese Weise wird das Niveau der Becken reguliert.

Die Ventilatoren der Kühltürme werden, je nach Bedarf (Austrittstemperatur), mittels zwei Stufen geregelt.

Damit die Verdunstungskühltürme möglichst effizient betrieben werden, sollte folgend Massnahme zur Effizienzsteigerung geprüft werden:

- Drehzahlregelung der Kaltwasserpumpen zu den Verdunstungskühltürmen nach dem Niveau des Warmwasserbeckens
- Drehzahlregelung der Kaltwasserpumpen zu den Maschinen nach den effektivem Bedarf der Maschinen

Mit der Drehzahlregelung der Pumpen kann auf den Überlauf bei den Becken verzichtet werden. Zudem kann auf die Überströmleitungen beim Kaltwasserbecken bzw. Maschinen-Vorlauf verzichtet werden. Wenn die Maschinen weniger Kältebedarf benötigen, wird die Drehzahl der Pumpen zurückgefahren. Das Prinzipschema mit der optimierten Anlage ist im Anhang A.1 ersichtlich.

Es wird angenommen, dass mit der Umrüstung auf frequenzgesteuerte Pumpen min. 25% der Pumpenergie eingespart werden kann.

### **3. Pinch-Analyse**

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

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

#### **3.1 Vorgehen Pinch-Analyse**

##### Schritt 1: Daten ermitteln

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

In der vorliegenden Arbeit mussten die Daten in Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal zuerst ermittelt werden (z.T. mit Messungen vor Ort).

### Schritt 2: Thermische Ströme definieren

Die Basis jeder Pinch-Analyse bilden die so genannten heißen und kalten Ströme. Ein Strom bezeichnet dabei einen thermodynamischen Fluidstrom (z.B. Wasser oder Luft). Ein Medium aufheizen wird als kalter Strom (z.B. Zuluft aufheizen), ein Medium abkühlen als heißer Strom (z.B. Rauchgase abkühlen) bezeichnet.

Ein Strom ist immer über die Temperaturdifferenz in K (z.B. Zuluft aufheizen von 20°C auf 100°C), den Massenstrom in kg/s und die Wärmekapazität in kJ/kg·K des Mediums definiert. Dies entspricht der Leistung in kW.

Die vollständige Stromtabelle der Anlage befindet sich im Anhang A-2.

### 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 (Wärmeinhalt) Kurve zusammengesetzt. Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine Verbundkurve.

Im besten Fall, wenn die Anlage vollständig optimiert wäre, würde der Heizbedarf 820 kW, der Kühlbedarf 120 kW und das WRG-Potenzial 232 kW betragen. Das Optimierungspotenzial bezogen auf den Fall ohne WRG beträgt somit 22%.

Dort wo sich die zwei Kurven am nächsten kommen spricht man vom "Pinch" (grüne senkrechte Linie). Pinch kommt aus dem englischen und kann als "Einschnürung" übersetzt werden. Der Pinch repräsentiert die minimale Temperaturdifferenz, die zur Wärmeübertragung notwendig ist.

Zudem teilt der Pinch die Verbundkurve in zwei thermodynamische Systeme: Eine Wärmequelle unter dem Pinch bzw. Wärmesenke über dem Pinch.

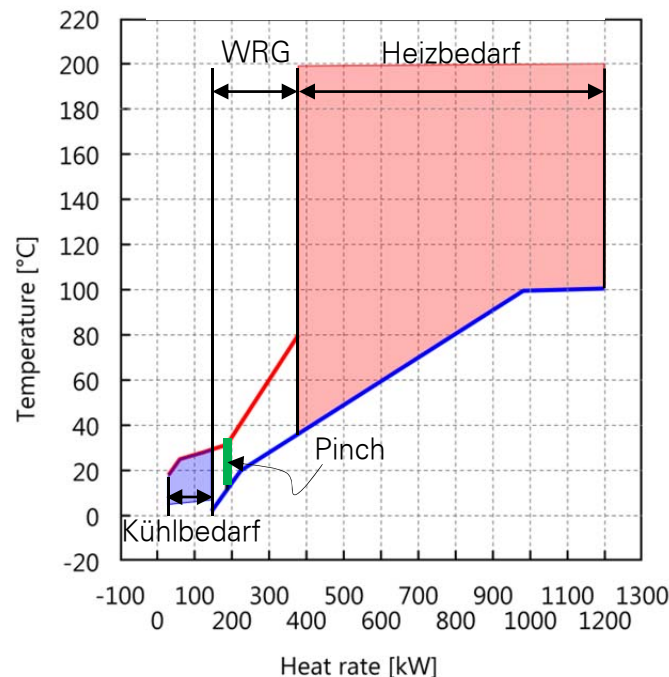


Abbildung 7: Verbundkurve,  $\Delta T = 20 \text{ K}$

#### Schritt 4: Wärmeübertrager-Netzwerk (HEN)

Im letzten Schritt der Pinch-Analyse wird systematisch ein HEN ermittelt, welches das WRG-Potenzial erreichen kann. Dessen Kosten bzw. Einsparung an Betriebsenergie lassen dann auf den Payback schliessen.

Ein HEN wird immer vom Pinch aus erstellt. Die Regeln der Pinch-Analyse sagen aus, dass niemals Wärme über den Pinch übertragen werden darf. Dies würde den Heiz- und Kühlbedarf der Anlage erhöhen.

### **3.2 Pinch-Analyse**

#### Grundlagen

Für die vorliegende Arbeit wurde mit mehreren Betriebsfällen gearbeitet. Die Heizungsanlage wurde auf drei verschiedene Fälle aufgeteilt: 1. Fall 0-2'500 h (450 kW), 2. Fall 2'500-4'500 h (250 kW) und 3. Fall 4'500-6'070 h (225 kW). Diese Aufteilung repräsentiert die nach Aussentemperaturen geführte Heizkurve. Zudem sind die Druckluftanlagen in die Betrachtung mit einbezogen. Diese haben mittlere Laufzeiten von ca. 4'000 h (bei mittlerer Leistung).

Die folgenden Grafiken sind daher auf die Energie bezogen, d.h. die Leistung wird mit den Betriebszeiten gewichtet. Auf diese Weise ist es möglich Verbundkurven, die zeitabhängig sind, zu verwenden.

#### Schmelzöfen

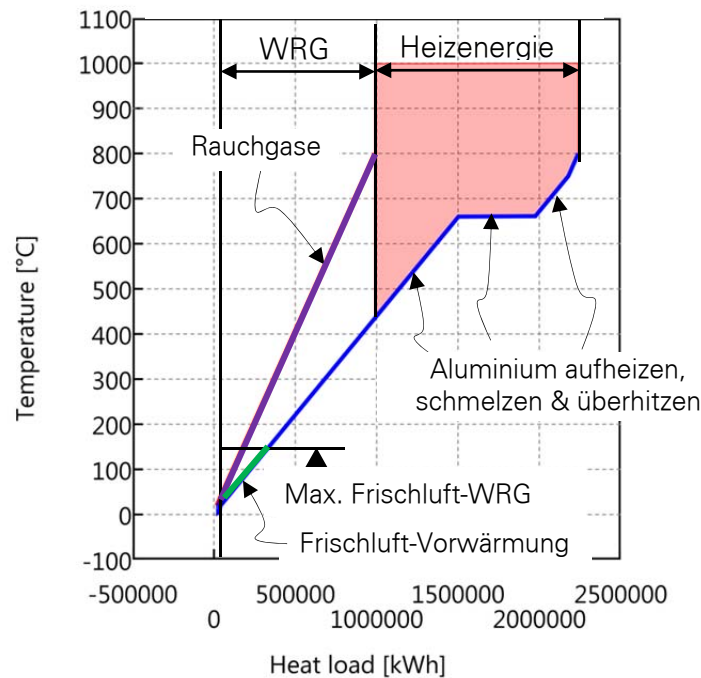
In Abbildung 3 wird aufgezeigt, dass ein Teil der Rauchgase der Schmelzöfen nach dem Schmelzprozess intern zirkuliert und zur Vorwärmung der Aluminiumbarren genutzt wird. Die Schmelzöfen sind mit einer internen WRG ausgestattet. Mit der Pinch-Analyse soll die Effizienz der WRG aufgezeigt werden.

Abbildung 8 zeigt die Verbundkurve des Schmelzofens 2x1. Die maximale (theoretische) WRG-Leistung des Ofens (mit heutigen Luftverhältnissen) beträgt 920 MWh/a. Die Differenz zu Abbildung 3, also der Ist-Situation mit 300 MWh/a (interne) WRG, beträgt somit 620 MWh/a.

Das interne, theoretische WRG-Potenzial der Schmelzöfen ist bedeutend höher, als die effektiv genutzte Wärmeleistung. Die Begrenzung ist wahrscheinlich auf Einschränkungen bei der Konstruktion zurückzuführen. Für die interne WRG durchströmen die heißen Gase die vorgelagerten Aluminium-Barren im Ofenschacht<sup>17</sup>. Es wird vermutet, dass die Verweilzeit der Rauchgase im Schacht die interne WRG beschränkt.

---

<sup>17</sup> Bayr. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (2005), Effiziente Energieverwendung in der Industrie - Teilprojekt "Metallschmelzbetriebe" Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben, Augsburg

Abbildung 8: Verbundkurve Schmelzofen 2x1,  $\Delta T = 10 \text{ K}$ 

Die interne WRG ist an die Konstruktion der Öfen gebunden und kann aus heutiger Sicht nicht mit vernünftigem Aufwand optimiert werden. Die einzige Massnahme die Wärme der Rauchgase weiter zu verwenden, muss extern der Öfen gesucht werden.

Abbildung 8 zeigt auf, dass die Rauchgase der Öfen zur Vorwärmung der Frischluft (grüne Linie) verwendet werden können. Gemäss dem Hersteller der Öfen, StrikoWestofen, darf die Frischluft zu den Brennern auf maximal 150°C vorgewärmt werden. Zudem sind die Frischluftmengen relativ klein. Für den grössten Ofen, 2x1, beträgt der mittlere Frischluft-Massenstrom lediglich 720 kg/h. Das heisst, dass die möglichen WRG-Leistungen relativ klein sind. Die Effizienz der WRG, Rückwärmzahl genannt, ist beschränkt bzw. verhältnismässig klein. Die möglichen WRG-Leistungen sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Ofen	Frischluft [kg/h]	Rauchgase [kg/h]	$t_1/t_2$ [°C]	$t_2/t_3$ [°C]	$Q_{WRG}$ [kW]	$Q_{WRG}$ [MWh]	Effizienz [%]
2x1	720	1'517	8/150	280/215	29	176	52
2x2	360	841	8/150	200/140	15	91	75
2x3	470	1'278	8/150	200/148	19	115	75
2x4	290	671	8/150	220/160	12	73	67

Tabelle 8: Daten WRG zur Vorwärmung der Frischluft von 8°C<sup>18</sup> auf 150°C (Betriebszeit 6'070 h)

<sup>18</sup> Nach SIA Merkblatt 2028 beträgt die mittlere Aussentemperatur von St.Gallen im jährlichen Durchschnitt 8.2°C.

Anmerkung:

WRG-Systeme bei Lüftungsanlagen auf dem Stand der Technik erreichen Effizienz bzw. Rückwärmehzahlen von 80-85%.

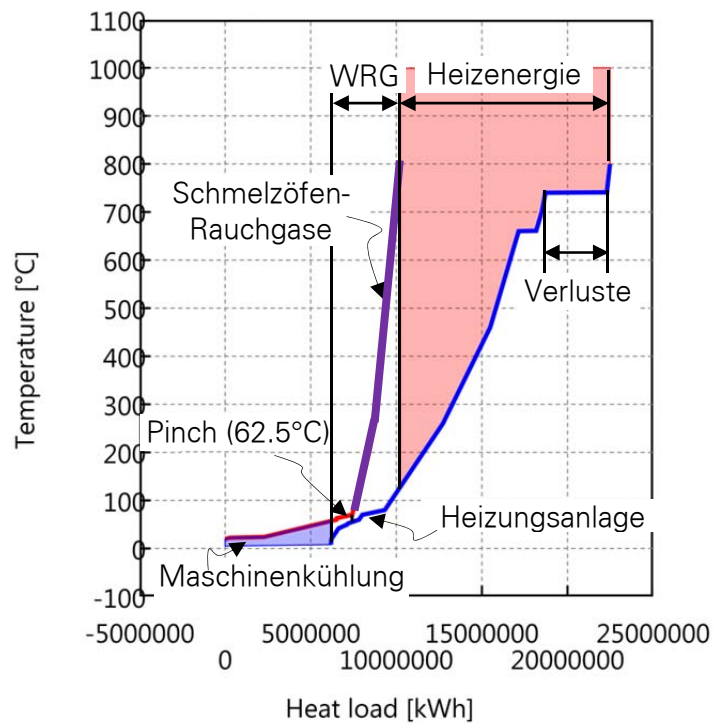
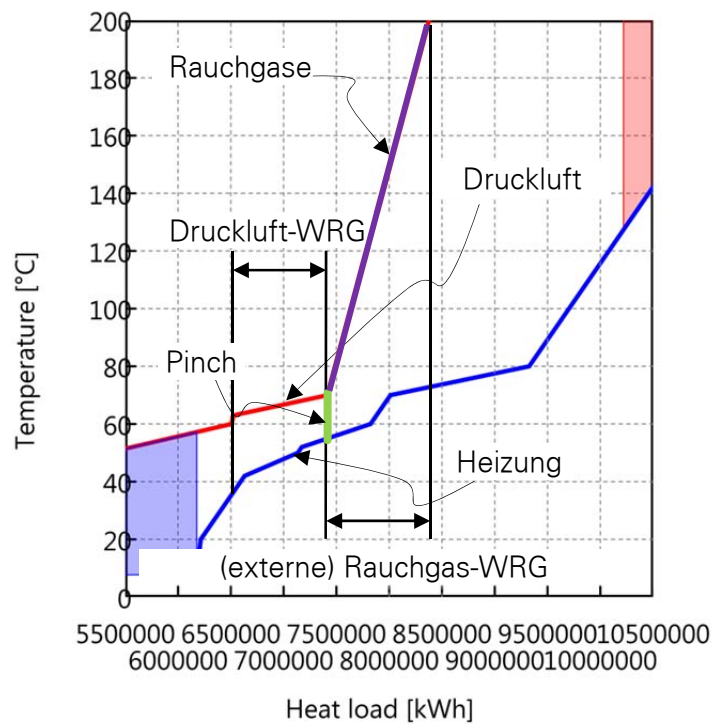
#### Gesamtes Areal

In Abbildung 9 ist die Verbundkurve vom ganzen Areal aufgezeigt. Die Energieverbraucher bzw. -Bezüger, d.h. die heissen und kalten Ströme der Verbundkurve, sind im Anhang in Tabelle 15 aufgeführt. Die Verbundkurve widerspiegelt das Energieflussdiagramm in Abbildung 1. Dem Heizenergiebedarf von 12.5 GWh/a steht ein maximales WRG-Potenzial von rund 4 GWh/a gegenüber.

Der grosse Heizenergiebedarf ist hauptsächlich auf den Erdgasbedarf der Schmelzöfen zurückzuführen. Diese benötigen für den Betrieb mehr Energie, als der reine Schmelzbetrieb effektiv benötigen würde. In Abbildung 3 wird dieser Energieanteil als "Verluste" bezeichnet. Er ist hauptsächlich durch die tiefe Auslastung der Öfen zu erklären. Von den 12.5 GWh/a Energiebedarf können ca. 3.5 GWh oder 30% diesen Verlusten zugeschrieben werden (vgl. Abbildung 9).

Das theoretische WRG-Potenzial von 4 GWh ist trotzdem gross. Von dieser Energiemenge werden heute ca. 800 MWh durch interne WRG der Öfen, 500 MWh durch Druckluft-WRG und 70 MWh durch die Rauchgas-WRG am Schmelzofen 2x3 zurückgewonnen. Das effektive WRG-Potenzial reduziert sich somit auf 2.6 GWh/a. Es ist auf die Energieströme der Schmelzöfen-Rauchgase (extern) sowie der erweiterten Druckluft-WRG zurückzuführen (vgl. Abbildung 10).

Ausserdem geben die Wärmebehandlungsanlagen (xx & xx) grosse Abluftmengen (ca. 100'000 m<sup>3</sup>) bei 60°C ins Freie ab. Hier ist zu beachten, dass die Abluftströme diskontinuierlich, d.h. in Zeitabschnitten von jeweils 20-30 Minuten anfallen (unregelmässig). Die wahrscheinlich einzige Möglichkeit diese Wärme zu nutzen, besteht darin, die Abluft (ca. 60°C) im Winter direkt in die Hallen einzublasen. Diese Möglichkeit besteht bereits bei einer Anlage (xx 2010).

Abbildung 9: Verbundkurve ganzes Areal,  $\Delta T = 15 \text{ K}$ , 6'070 h/aAbbildung 10: Verbundkurve ganzes Areal (Zoom),  $\Delta T = 15 \text{ K}$ , 6'070 h/a

### WRG intern Heizungsanlagen

Der jährliche Energiebedarf für die Heizungsanlagen beträgt im Betrieb rund 2'000 MWh/a (Annahme aus Energiefluss). Dies ist ein sehr grosser Wert für Büroräume mit einer Energiebezugsfläche (EBF) von ca. 10'000 m<sup>2</sup> (Angabe vom Betrieb). Bei einer typischen spezifischen Wärmeleistung von 70 W/m<sup>2</sup> und 2'000 h Vollbetriebszeit der Heizung entspricht dies einem theoretischen Wärmebedarf von ca. 1'500 MWh/a.

Der Vergleich mit dem effektiven Wärmebedarf von 2'000 MWh/a lässt den Schluss zu, dass die Heizung Optimierungspotenzial aufweist. Dieses kann typischerweise einfach ausgeschöpft werden. Bevor WRG-Anlagen bei den Prozessen installiert werden, sollte daher das (einfach zu erschliessende) Potenzial mittels Betriebsoptimierung ausgeschöpft werden.

Wie in Kapitel 3.2.2. beschrieben, werden heute im Betrieb bereits WRG betrieben. Dies bei der Druckluft (500 MWh) und bei einem Schmelzofen (70 MWh). Würde das WRG-Potenzial der Druckluft voll ausgeschöpft, könnten der Wert auf ca. 750 MWh erhöht werden. Das WRG-Potenzial beim Schmelzofen 2x3 könnte bei optimiertem Betrieb, d.h. grössere Fläche beim Wärmeübertrager, nahezu verdoppelt werden. Abbildung 11 zeigt die Jahresdauerlinie (Summenhäufigkeit) der Heizungsanlage mit der Druckluft-WRG (orange), Rauchgas-WRG (blau) und dem möglichen WRG-Potenzial (grüne Linie). Eine effiziente WRG für Heizungsanlagen sollte mindestens 2'000 h in Betrieb sein, da nur mit hohen Laufzeiten die WRG effizient ausgeschöpft werden kann. Dies entspricht in Abbildung 11 einer maximalen Aussentemperatur von 4°C bzw. Vorlauftemperatur der Heizung von 60°C (vgl. Heizkurve<sup>19</sup> im Anhang).

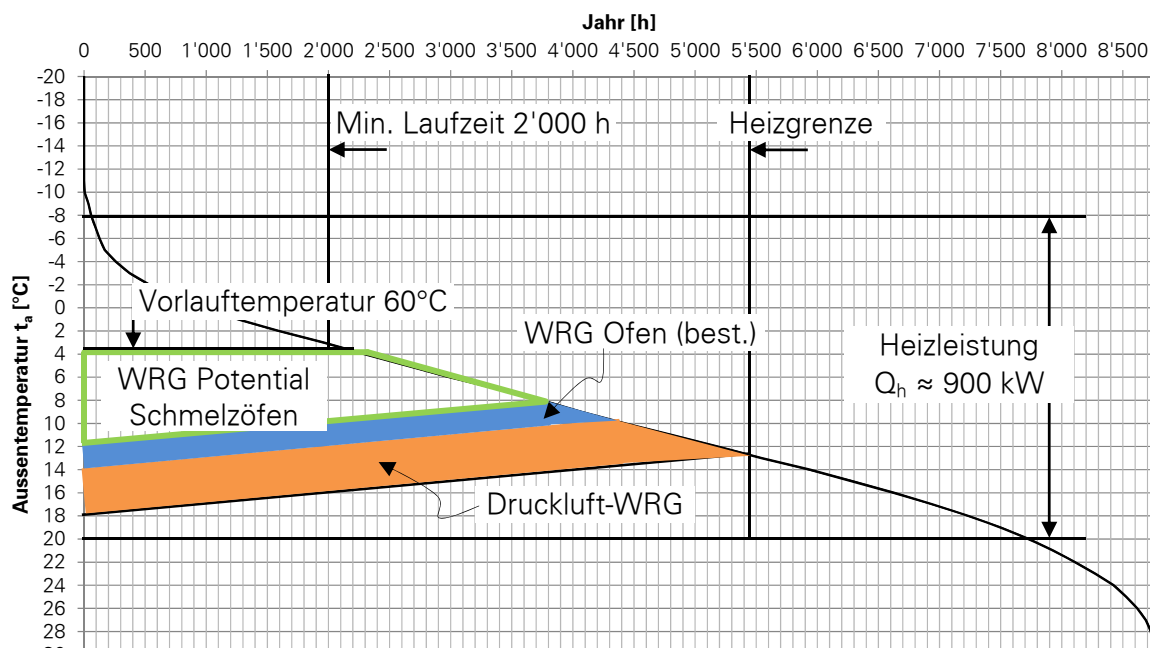


Abbildung 11: Jahresdauerlinie der Heizung mit bestehenden WRG und WRG-Potenzial, Auslegung 20°C/-8°C, Heizleistung  $\approx$  900 kW, Heizgrenze 14°C

<sup>19</sup> Eine Heizungsanlage wird typischerweise nach der Aussentemperatur geregelt. Dazu ist das System mit einer Heizkurve hinterlegt. Diese zeigt den Zusammenhang zwischen der Aussentemperatur, Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Heizgrenze.



Um eine Vorlauftemperatur von max. 60°C zu erreichen, können die Rauchgase auf 75°C abgekühlt werden (d.h.  $\Delta T = 15$  K). Bei 2'500 h/a Betriebszeit der Rauchgas-WRG und einer Leistung von 205 kW (Daten aus Tabelle 4) kann somit eine Energiemenge von ca. 510 MWh aus den Rauchgasen für die Heizungsanlage verwendet werden. In Tabelle 9 sind die potenziellen Rauchgas-WRG aufgelistet.

Ofen	Rauchgase [kg/h]	$t_1/t_2$ [°C]	$t_2/t_3$ [°C]	$Q_{WRG}$ [kW]	$Q_{WRG}$ [MWh]
2x1	1'517	50/60	280/75	95	238
2x2	841	50/60	200/75	32	80
2x3	1'278	50/60	200/75	49	123
2x4	671	50/60	220/75	30	75

Tabelle 10: Daten Rauchgas-WRG der Schmelzöfen, Betriebszeit 2'500 h

### WRG intern mit Wärmepumpe

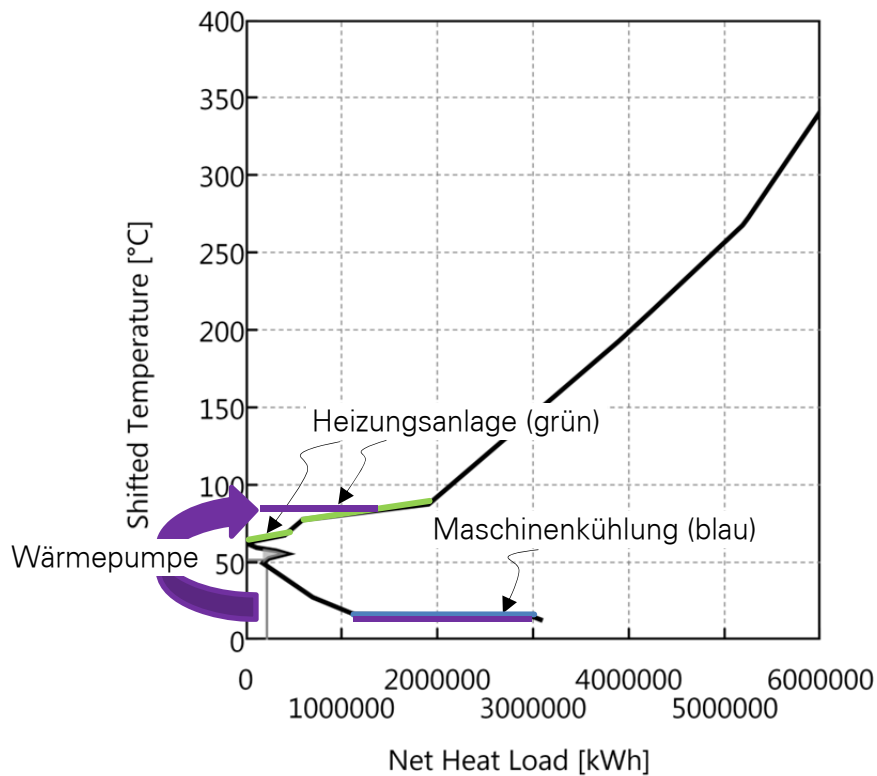
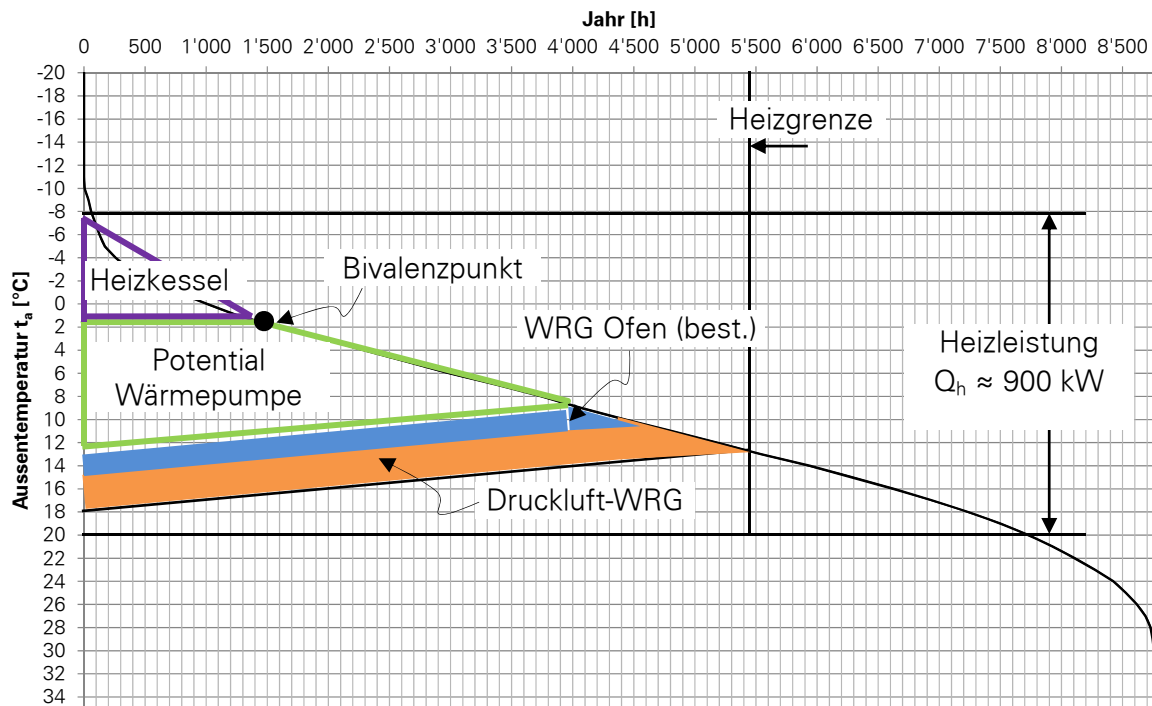
Eine Wärmepumpe muss nach den Regeln der Pinch-Analyse immer über den Pinch arbeiten. Der Grund dafür ist, dass ein Energiesystem oberhalb vom Pinch in eine Wärmesenke und unterhalb in eine Wärmequelle getrennt wird. Eine Wärmepumpe nutzt eine Wärmequelle auf tiefem Temperaturniveau und transformiert diese mittels Strom auf ein höheres Temperaturniveau - in eine Wärmesenke.

Im Betrieb liegt der Pinch in Abbildung 9 bei 62.5°C. Als Wärmequelle unterhalb vom Pinch zeigt sich die Maschinenkühlung und als Wärmesenke oberhalb vom Pinch die Heizungsanlage. Abbildung 12 zeigt die entsprechende Verbundkurve<sup>20</sup>. Das Temperaturniveau für die Wärmepumpe ist beispielhaft eingezeichnet (violett).

Eine Wärmepumpe kann alternativ zur Rauchgas-WRG genutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Wärmepumpe nur bis zu einem "Bivalenzpunkt" betrieben werden sollte. Typischerweise liegt dieser Punkt, also wenn der Heizkessel dazu schaltet, bei 0-2°C. Im Betrieb wird davon ausgegangen, dass ab einer Aussentemperatur von 2°C zusätzlich mit dem Kessel gearbeitet werden muss (vgl. Abbildung 13).

Die Wärmequelle der Maschinenkühlung liegt bei knapp 25°C. Gemäss aktueller Heizkurve (vgl. Abbildung 20 im Anhang A.3) entspricht eine Aussentemperatur von 2°C einer Heizungsvorlauftemperatur von 62°C. Im schlimmsten Fall müsste die Wärmepumpe somit einen Temperaturhub von 40 K erreichen.

<sup>20</sup> In der Fachliteratur wird diese Verbundkurve als "Grand Composite Curve (GCC)" bezeichnet. Sie lässt sich aus den einfachen Verbundkurven ableiten. Sie wird typischerweise verwendet um die optimale Leistung und die Temperaturniveaus für Heizung und Kühlung eines Prozesses zu bestimmen. Aus der Kurve kann ausserdem Potential für eine Wärmepumpe abgeleitet werden. Der Pinch zeigt sich am Punkt, wo der Wärme- bzw. Kühlbedarf Null ist.

Abbildung 12: (Gesamt)-Verbundkurve mit Wärmepumpe,  $\Delta T = 10 \text{ K}$ Abbildung 13: Jahresdauerlinie der Heizung mit Potenzial für eine Wärmepumpe, Auslegung nach SIA 20°C/8°C, Heizleistung  $\approx 900 \text{ kW}$ , Heizgrenze 14°C

Würde die Heizungsanlage zusätzlich optimiert, könnte die Heizkurve abgesenkt werden (vgl. Abbildung 21 im Anhang A.3). In diesem Fall müsste die Wärmepumpe nur bis auf 50°C Vorlauftemperatur arbeiten. Dies entspricht einem Temperaturhub von 25 K und entsprechend einem sehr effizienten COP von ca. 6.5. Im jährlichen Durchschnitt müsste die Wärmepumpe nicht mit 50°C Vorlauftemperatur arbeiten. Im Teillastbetrieb sind die Temperaturen noch tiefer und die Wärmepumpe noch effizienter.

Die Wärmepumpe würde gemäss Jahresdauerlinie (Abbildung 13) ab 10°C Aussentemperatur zusätzlich zur Druckluft-WRG arbeiten (vgl. Abbildung 21 im Anhang A.3). Ab 0°C Aussentemperatur würde der Heizkessel bivalent-parallel zur Wärmepumpe betrieben. Dies entspricht bei einer angenommenen Heizleistung von 750-900 kW einer Abdeckung der Wärmepumpe von ca. 850-1'100 MWh/a oder 55-60% der jährlichen Heizenergie.

Ein vereinfachtes Prinzipschema der Heizungsanlage mit Wärmepumpe ist im Anhang A.1 in Abbildung 19 aufgezeigt.

Damit eine Wärmepumpe effizient und bivalent zu einem Heizkessel betrieben werden kann, müssen folgende Punkte erfüllt sein (vgl. Abbildung 21 im Anhang A.3):

- Möglichst tiefe Rücklauftemperatur auf der Heizungsanlage (d.h. keine Umlenkschaltungen bei der Wärmeverteilung)
- Möglichst hohe Rücklauftemperatur von der Maschinenkühlung (d.h. diese sollte wenn möglich noch erhöht werden)
- Hallenheizungen (wenn nötig) mit maximal 18 °C Raumtemperatur betreiben
- Rückkühlbecken mit genügend hoher Kapazität für die Wärmepumpe (d.h. dies muss mit einer Messung überprüft und validiert werden)

Aus heutiger Sicht ist die Datenlage zu schwach, um die Wärmepumpe abschliessend zu beurteilen. Für die effektive Machbarkeit muss die Anlage gemessen und in einer Vorstudie geprüft werden. Dies ist ein sehr wichtiger Schritt, um die Effizienz einer potenziellen Wärmepumpe zu beurteilen. Eine Wärmepumpe kann nur effizient betrieben werden, wenn die genauen Rahmenbedingungen und Funktionen der Anlage bekannt sind.

### WRG mittels Fernwärme

Zur externen WRG mittels Fernwärme können zwei Varianten geprüft werden:

- Warme Fernwärme, d.h. hohe Vorlauftemperatur, z.B. 75°C
- Kalte Fernwärme, d.h. tiefe Vorlauftemperatur, z.B. 30°C

Ausserdem sollten für einen sinnvollen Einsatz einer (effizienten) Fernwärme im Betrieb folgende Kriterien erfüllt sein.

- Die Wärme kann intern bei den Prozessen und den Heizungsanlagen nicht verwendet werden.
- Die Wärme kann das ganze Jahr, d.h. mindestens 6'000 h/a, ins Fernwärme-Netz abgegeben werden.

### *Warme Fernwärme*

Abbildung 14 zeigt beispielhaft die (Gesamt)-Verbundkurve mit einem potenziellen Wärmebezüger von 500 kW (bei VL/RL 75°C/65°C und 6'070 h Betriebszeit). Zum besseren Verständnis enthält die Kurve nur Ströme mit einem (potenziellen) Wärmeüberschuss, die auch für eine Fernwärme genutzt werden können, d.h. Rauchgase und Maschinenkühlung. Das direkte WRG-Potenzial (Rauchgase) mittels warmer Fernwärme ist mit 1'100

MWh/a gegeben. Die Maschinenkühlung kann nicht direkt genutzt werden. Im Falle einer warmen Fernwärme müsste diese Wärmequelle mittels Wärmepumpe über den Pinch transformiert werden. Der Temperaturhub der Wärmepumpe wäre ca. 40 K, was einem COP von ca. 4.5 entspricht.

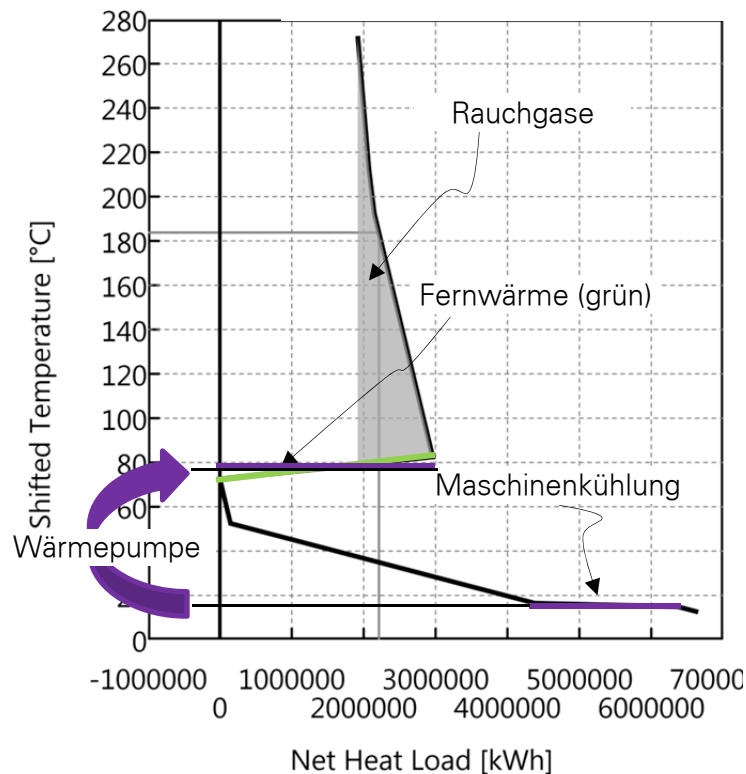


Abbildung 14: (Gesamt)-Verbundkurve, warme Fernwärme,  $\Delta T = 15 \text{ K}$

### Kalte Fernwärme

Eine kalte Fernwärme wird mit tiefen Vorlauftemperaturen von beispielsweise  $30^\circ\text{C}$  betrieben. Dies hat den Vorteil, dass die Wärmedämmung der Rohre geringer und die Investitionen tiefer sind. Für den Betrieb hätte eine kalte Fernwärme den Vorteil, dass die Wärmesenken auf ein tieferes Temperaturniveau abgekühlt werden könnten. Die Wärmeleistung der Rauchgas-WRG könnte maximal ausgenutzt werden.

Eine kalte Fernwärme könnte zudem für die Maschinenkühlung interessant sein. Die Rücklauftemperatur könnte auf die Eintritts-Kühltemperatur der Maschinen geregelt werden. Der Betrieb könnte auf diese Weise die kalte Fernwärme direkt als "Fernkälte" nutzen.

Voraussetzung ist auch bei dieser Variante, dass ein Abnehmer möglichst ganzjährig Wärme auf tiefem Temperaturniveau ( $25\text{-}30^\circ\text{C}$ ) beziehen würde, z.B. mittels Wärmepumpe. Auf diese Weise könnte der externe Verbraucher die "Fernkälte" kühlen und zum Betrieb für die Maschinenkühlung zurückschicken.

Die Rauchgas-WRG könnte mit der kalten Fernwärme ca.  $1'500 \text{ MWh/a}$  Wärme abgeben.

Die Maschinenkühlung wird heute mit zwei Pumpen mit einem maximalen Volumenstrom von  $170 \text{ m}^3/\text{h}$  betrieben. Unter der Annahme, dass die Pumpen mit einer durch-

schnittlichen Auslastung von 70% arbeiten und die Wassermenge aus dem Warmwasserbecken um 5 K abgekühlt werden kann, entspricht dies einer Wärmeleistung von knapp 700 kW. Bei 6'000 Betriebsstunden sind dies 4'200 MWh/a.

Zwischen der Halle West und Ost ist ein weiterer Kühlturm installiert. Eventuell könnte auch dieser für ein externes Energienetz genutzt werden. Genauere Daten zur Anlage sind nicht bekannt. Es wird jedoch angenommen, dass die Rückkühlmenge um weitere 1'000-2'000 MWh/a auf bis zu 5'200-6'200 MWh/a erhöht werden könnte.

Für ein Energienetz bzw. Fernkältenetz müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Möglichst hohe Temperatur im Warmwasserbecken: Ziel 30°C
- Möglichst grosse Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltwasserbecken: Ziel min. 5 K
- Möglichkeit ganzjährig Wärme an das Fernkältenetz abzugeben, um damit die Maschinen zu kühlen
- Die Wassermenge und Temperaturen über die Maschinen muss mit einer Messung (über min. zwei Wochen) validiert werden.

Die angenommenen Energiemengen aus Daten der installierten Pumpenleistungen hochgerechnet. Sie sollen einen ersten Richtwert angeben. Genauere Daten müssen mittels Messung geprüft und validiert werden.

#### Wärmeerkopplung (WKK)

Eine Möglichkeit im Betrieb eine WKK zu betreiben, wäre die Verwendung einer ORC-Anlage<sup>21</sup>. Als Nachteile bei kleinen Leistungen müssen die Investitionskosten und der Wirkungsgrad der Anlage genannt werden. Aus diesem Grund gilt der Grundsatz, dass eine ORC-Anlage erst eingesetzt werden sollte, wenn die Wärme weder intern noch extern direkt verwendet werden kann.

Im Betrieb müsste eine ORC-Anlage auf einem Temperaturniveau von mindestens 130°C betrieben werden. Tiefere Temperaturen verschlechtern nur den Wirkungsgrad der Anlage. Nach den Regeln der Pinch-Analyse sollte eine ORC-Anlage die Wärmequelle unterhalb vom Pinch<sup>22</sup> nutzen. Dieser liegt im Betrieb gemäss Abbildung 9 bei 65°C (ganzes Areal) bzw. bei 73°C gemäss Abbildung 14 (nur WRG-Ströme). Aus Sicht der Pinch-Analyse steht somit im Betrieb keine sinnvolle Wärmequelle für einen ORC-Prozess zur Verfügung.

Eine ORC-Anlage mit 130°C Eintrittstemperatur erreicht einen Wirkungsgrad von maximal 15%<sup>23</sup>. Wenn im Betrieb die Rauchgase der Schmelzöfen entsprechend abgekühlt würden, ergäbe sich eine Wärmeleistung von ca. 110 kW. Bei einem Wirkungsgrad von 15% könnte somit ein ORC-Modul rund 17 kW elektrische Leistung generieren. Bei 6'070 h

---

<sup>21</sup> Ein Organic-Rankine-Cycle (ORC) funktioniert nach dem Prinzip einer Dampfturbine. Als Arbeitsmedium wird dabei, anstatt Wasserdampf, ein organisches Medium (z.B. Penthan) verwendet, das bei tieferen Temperaturen (und Druck) betrieben werden kann. ORC-Anlagen können typischerweise Wärmequellen von > 100°C nutzen, um diese mittels Dampfturbine und Generator in Strom und Wärme umzuwandeln.

<sup>22</sup> Kemp, I. (2007), Pinch Analysis and Process Integration, A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, Elsevier Ltd.

<sup>23</sup> Retting, A. (2011), Aus Abwärme wird Strom, ZHAW, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, Winterthur

Betriebszeit (wenig für einen ORC-Prozess mit idealerweise 8'000 h Betriebszeit) könnte der Betrieb ca. 105 MWh elektrische Energie produzieren.

Die Investitionen für eine ORC-Anlage sind in Kapitel 4 aufgezeigt.

### Power to Gas (P2G)

Das Prinzip P2G "wandelt" Strom (Spitzen im Netz) in Methan um und speist damit das Erdgasnetz. Abbildung 15 zeigt beispielhaft das Prinzip P2G und wie der Betrieb in diesen Prozess eingebunden werden könnte.

Methan für das Erdgasnetz wird mittels Elektrolyse und Methanisierung erzeugt. Dazu wird mittels Elektrolyse Wasser ( $H_2O$ ) in Wasserstoff ( $H_2$ ) (und Sauerstoff  $O_2$ ) aufgespalten und dieses in der Methanisierung mit dem Zusatz Kohlendioxid ( $CO_2$ ) in Methan ( $CH_4$ ) (und Sauerstoff  $O_2$ ) gewandelt.

Der Betrieb könnte in dieser Prozesskette das  $CO_2$  liefern<sup>24</sup>. Dieses kann mittels Clime-works<sup>25</sup>-Anlage und Abwärme vom Betrieb aus der Luft gewonnen werden.

Eine Clime-works-Anlage, die 1'000 t/a  $CO_2$  produziert, fordert folgende Energiequellen<sup>26</sup>:

- Temperaturniveau VL/RL 100°C/90°C
- Wärmeleistung 300 kW (möglichst konstant)
- Elektrische Leistung 30-40 kW
- Luftmenge 7'000 m<sup>3</sup>/min

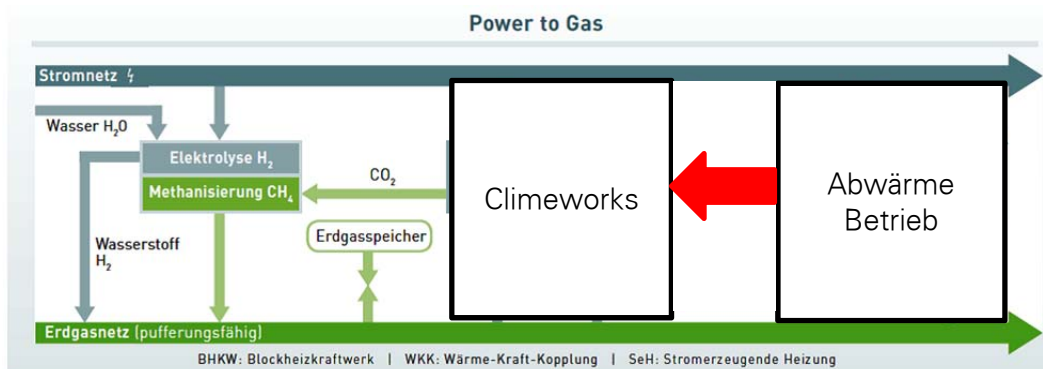


Abbildung 15: Prinzip Power to Gas (Quelle: adaptiert von AEE & VSG)

Aus Sicht der Pinch-Analyse sollte eine Clime-works-Anlage unterhalb vom Pinch platziert werden. Nur unterhalb vom Pinch zeigt das Energiesystem eine Wärmequelle mit überschüssiger Energie. Im Betrieb liegt der Pinch, wenn alle interne WRG genutzt wird, bei 65°C (vgl. Abbildung 9). Eine Clime-works-Anlage kommt also nur in Frage, wenn die Wärme weder intern noch extern Verwendung findet.

Aus heutiger Sicht, mit der heutigen Auslastung der Schmelzöfen, kann der Betrieb eine (mittlere) Wärmeleistung von 155 kW auf gefordertem Temperaturniveau bereitstellen.

<sup>24</sup>  $CO_2$  muss nicht primär für P2G verwendet werden. Kommerziell hergestelltes  $CO_2$  kann auch in Treibhäusern oder bei der Getränkeherstellung verwendet werden.

<sup>25</sup> Clime-works ist ein Start-up Unternehmen der ETH Zürich. Clime-works versucht Anlagen, die  $CO_2$  aus Luft extrahieren, zur Marktreife zu führen. Dabei sollen vor allem Industriekunden mit  $CO_2$  beliefert werden, z.B. Getränkehersteller.

<sup>26</sup> Daten aus Besprechung, 20.05.2014, mit Dominique Kronenberg von Clime-works.

Bei optimaler Auslastung der Öfen kann der Wert auf ca. 200 kW erhöht werden. Es ist zu beachten, dass die Wärme im Betrieb mit diskontinuierlicher Wärmeleistung anfällt. Die Schmelzöfen modulieren zwischen Schmelz- und Warmhaltebetrieb die Brennerleistung.

Aus technischer Sicht ist die Installation einer Climeworks-Anlage zwar möglich, aber sehr aufwändig und nicht unproblematisch (diskontinuierlicher Wärmeanfall). Sie sollte nur als letzte Wahl, allenfalls hinter einer ORC-Anlage, betrachtet werden.

Die Investitionen für eine Climeworks-Anlage sind in Kapitel 4 aufgezeigt.

## 4. Massnahmen aus Pinch-Analyse

Für die wirtschaftliche Bewertung werden Energiepreise von 10 Rp./kWh für Strom und 6 Rp./kWh für Erdgas verwendet. Die Betrachtung ist zum jetzigen Zeitpunkt rein statisch. Bevor für oder gegen eine grössere Investition entschieden wird, muss diese unbedingt auch dynamisch betrachtet werden (z.B. mit der Barwert-Methode).

### 4.1 Massnahmen Prozessanlagen

In Tabelle 12 sind die Massnahmen aufgeführt, die aus der Pinch-Analyse resultieren. Es sind nur Massnahmen, die direkt mit den thermischen Prozessen verbunden sind, aufgeführt. Die Massnahmen sind mit Energieeinsparung und (wenn möglich) Payback angegeben. Es sind nur Massnahmen aufgeführt, die direkt Investitionen auslösen.

#### Massnahmen am Prozess<sup>27</sup>

Die Massnahmen direkt an den Prozessen sind in Tabelle 12 aufgeführt. Da die Massnahmen direkten Einfluss auf den Prozess haben, können sie zum heutigen Zeitpunkt noch nicht genau spezifiziert werden. Sie müssen zuerst in Zusammenarbeit mit dem Hersteller der Öfen, StrikoWestofen, eruiert werden. Die aufgeführten Daten zu Energieeinsparung und Kosten sind eine erste Einschätzung.

Die Investitionskosten für die PVS mit Porenbrenner wurden in einem ersten Gespräch mit der Firma Promeos ermittelt. Die Massnahmen an der xx-Anlage wurden mit xx Thermprocess eruiert.

Anlage	Massnahme	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [Jahre]
Schmelzöfen	Standard-Massnahmen	750	120'000	3
Pfannenvorwärmstationen (PFS)	Auf Porenbrenner umrüsten (bei 3 Anlagen)	500	120'000	4
Wärmebehandlung xx	Rekuperationsbrenner 230 kW (1 x)	60	40'000	11
Wärmebehandlung xx	Frischluftvorwärmung im Kamin	40	25'000	10.5

Tabelle 11: Massnahmen direkt am Prozess

<sup>27</sup> Hinweis: Die Massnahme können zum heutigen Projektstand noch nicht genau spezifiziert werden. Bei der erwarteten Investition handelt es sich um eine erste Einschätzung.

### Massnahmen WRG am Prozess

In Tabelle 12 sind die direkten WRG Massnahmen an den Prozessen aufgelistet.

Anlage	Massnahme	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [Jahre]
Schmelzofen 2x1	Frischluft-WRG	176	50'000	4.8
Schmelzofen 2x2	Frischluft-WRG	91	50'000	9
Schmelzofen 2x4	Frischluft-WRG	73	50'000	11.5

Tabelle 12: Massnahmenliste WRG am Prozess

### 4.2 Massnahmen WRG Heizungsanlagen

In Tabelle 13 sind die direkten WRG Massnahmen für die Heizungsanlagen aufgelistet. Für WRG Massnahmen "extern", d.h. mittels Fernwärme, sind keine Kosten ausgewiesen. Die Datenlage ist zum jetzigen Projektstand zu grob, um vernünftige Daten zu den Kosten zu ermitteln.

Anlage	Massnahme	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [Jahre]
Schmelzofen 2x1	Rauchgas-WRG Heizung (Ost)	238	130'000	9
Schmelzofen 2x2	Rauchgas-WRG Heizung (Ost)	80	80'000	16.5
Schmelzofen 2x3	Rauchgas-WRG Heizung (West) optimieren	70	25'000	5.9
Schmelzofen 2x4	Rauchgas-WRG Heizung (West)	75	80'000	18
Druckluft 90 kW	WRG Heizung (West)	126	20'000	2.5
Druckluft 110 kW	WRG Heizung (West)	190	70'000	6
Heizungsanlage /Rückkühlbecken	Wärmepumpe (synthetisches KM)	- 975 Erdgas <sup>28</sup> / +150 Strom	450'000	10

Tabelle 13: Massnahmenliste WRG bei Heizungsanlagen (intern)

### 4.3 Massnahmen Rückkühlung

In Abbildung 16 sind die Massnahmen zur Energieeinsparung (Schätzung) bei der Rückkühlung aufgeführt. Als wichtige Massnahme sollten die Rückkühlpumpen auf mögliche Drehzahlregulierung geprüft werden.

<sup>28</sup> Die Einsparung in Tabelle 13 ist als Mittelwert der Bandbreite von 850-1'100 MWh/a zu verstehen. Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage optimiert werden kann und dann maximal 1'500-1'800 MWh/a Energie benötigt. Der Wert in Tabelle 13 muss, bevor für oder gegen eine Installation entschieden wird, gemessen und validiert werden.



Anlage	Massnahme	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [Jahre]
Vorlauf Rückkühler	Frequenzgesteuerte Pumpe	25	15'000	6
Vorlauf Maschinen	Frequenzgesteuerte Pumpe	25	15'000	6

Abbildung 16: Massnahmen Rückkühlung

#### 4.4 Massnahmen ORC / Climeworks

In Tabelle 14 sind die ORC- und Climeworks-Anlage aufgelistet. Für die ORC-Anlage werden die (groben) Investitionskosten ausgewiesen. Für die Energieeinsparung wird angenommen, dass die Rauchgase der Schmelzöfen für den ORC-Prozess verwendet werden. Zudem wird angenommen, dass der produzierte Strom direkt intern im Betrieb verwendet und dadurch Strom eingespart werden kann.

Die Betriebszeit wird entsprechend dem Schichtbetrieb im Werk mit 6'070 h angenommen.

Für die Climeworks-Anlage werden nur die (groben) Investitionskosten ausgewiesen. Im Gespräch mit Climeworks wurde eruiert, dass die Anlage nur als Prototyp gebaut werden könnte. Die Investitionskosten sind entsprechend hoch und ein wirtschaftlicher Betrieb (aus heutiger Sicht) ausgeschlossen. Es ist zudem extrem unsicher, zu welchem Preis der Betrieb das CO<sub>2</sub> an einen Getränkehersteller oder P2G-Betreiber verkaufen könnte. Ein Payback kann bei der vorliegenden Datengrundlage nicht mit vernünftiger Genauigkeit angegeben werden.

Für P2G werden keine Kosten angegeben. Für ein P2G-Konzept würde der Betrieb nur das CO<sub>2</sub> liefern. Der restliche Teil der Anlage, z.B. Elektrolyse und Methanisierung, wären nicht in der Zuständigkeit vom Betrieb sondern vom Betreiber der P2G-Anlage (z.B. SGSW).

Anlage	Leistung	Einsparung [MWh/a]	Kosten [CHF]	Payback [Jahre]
ORC-Anlage	130 <sub>th</sub> /20 <sub>el</sub>	121	350'000	30
Climeworks	300 kW	-	1'000'000	

Tabelle 14: Massnahmen mittels ORC / Climeworks

## 5. Empfehlung

Die Pinch-Analyse der Prozessanlagen und der Heizungsanlagen hat gezeigt, dass im Betrieb ein beträchtliches Energieeinsparpotenzial vorhanden ist. Insbesondere bei den Schmelzöfen und den PVS wird das Potenzial als sehr gross eingeschätzt.

### 5.1 Schmelzbetrieb

Im Energieflussdiagramm vom Areal (Abbildung 2) wird aufgezeigt, dass im Betrieb die Schmelzerei "den grossen Hebel" zur Energieeinsparung darstellt.

Der Energiefluss der Schmelzöfen (Abbildung 3) zeigt auf, dass vor allem durch die tiefe (und schwankende) Auslastung der Öfen grosse Energiemengen aufgewendet werden. Für das Warmhalten der Schmelze in den Öfen wird ähnlich viel Energie aufgewendet,

wie für den reinen Schmelzbetrieb. Der Betrieb sollte daher versuchen, die Auslastung der Öfen und somit die Produktionskapazität im Werk zu steigern (Zielwert: 80% Schmelzbetrieb).

Die Effizienz-Steigerung bei optimaler Auslastung würde, bezogen auf den heutigen Metaldurchsatz (Tabelle 3), ca. 1'400 MWh/a betragen. Das heisst, dass diese Energiemenge direkt dem Schmelzbetrieb und somit dem Produkt zugeführt würde und nicht nur zum Warmhalten von Schmelze verbraucht wird.

Für die Schmelzöfen hat Rudolf Hillen, Entwicklung StrikoMelter bei StrikoWestofen, Standard-Massnahmen (Kapitel 2.1) vorgeschlagen. Sie sollen helfen, die Effizienz der Schmelzöfen zu verbessern (Zielwert > 50%). Der Betrieb sollte diese unbedingt mit Striko-Westofen prüfen. Bei 10% Energieeinsparung (Schätzung) würde dies heute 750 MWh/a Erdgas entsprechen.

Der Betrieb sollte den Schmelzbetrieb zukünftig als energetische Prozesskette betrachten. Zu dieser Prozesskette gehören die Schmelzöfen, die PVS und die Druckgussmaschinen. Entsprechend sollte der Fokus des Energie-Monitoring auch auf die PVS und die Druckgussmaschinen ausgeweitet werden (Notfalls mit dem Einbau von zusätzlichen Energie- oder Erdgaszählern).

Die PVS benötigen im Werk bis zu 1'900 MWh/a Erdgas (Hochrechnung). Der Wert konnte nicht genau ermittelt werden, da keine genauen Daten bekannt sind. In Zukunft sollte der Betrieb auch den Energieverbrauch der PVS im Detail beachten.

Die Firma Promeos bietet neuartige Porenbrenner (auf Hochtemperatur-Keramik basierend) an. Diese sollen bis mindestens 50% Energie einsparen und zudem die Qualität des Vorwärm- und Transferprozesses deutlich verbessern. Ausserdem können mit den Porenbrennern die Schmelzbadtemperatur in den Schmelzöfen verringert werden. Ein Technologiewechsel bei den PVS hätte also Auswirkungen auf die gesamte energetische Prozesskette. Der Betrieb könnte mit dieser Massnahme min. 500 MWh/a Erdgas einsparen (konservative Schätzung).

Mit der heutigen Auslastung der Schmelzöfen ist die Vorwärmung der Frischluft nur beim grössten Ofen 2x1 wirtschaftlich interessant. Dabei ist zu beachten, dass die Effizienz der WRG tief ist ( $\approx 50\%$ ). Der Grund dafür liegt bei den kleinen Frischluftmengen der Schmelzöfen. Die grosse Energiemenge der Rauchgase kann also nur beschränkt genutzt werden. Trotz der Energieeinsparung von rund 170 MWh/a beim Ofen 2x1 wird diese Massnahme nicht zur Umsetzung empfohlen.

## 5.2 Rückkühlanlage

Im Betrieb wird die Rückkühlung der Druckgussmaschinen mit Verdunstungskühlern betrieben. Effiziente Verdunstungskühler sollten mit möglichst hohen Wassertemperaturen (Warmwasserbecken) betrieben werden. Diese Temperatur, also der Rücklauf von den Maschinen, sollte unbedingt mit dem Hersteller der Druckgussmaschinen überprüft werden.

Wenn möglich, sollten die Kaltwasserpumpen des Rückkühlsystems mittels Drehzahlregelung betrieben werden. Es könnte 20-30% Pumpenstrom eingespart werden.

### 5.3 WRG in Heizungsanlage

Mit dem Betrieb wurde für die Heizungsanlage ein Energiebedarf von rund 2'000 MWh/a ermittelt. Dies ist ein sehr grosser Energiebedarf für eine Heizung die (nur) ca. 9'000 m<sup>2</sup> Fläche beheizt. Genaue Daten sind auch bei der Heizung nicht bekannt.

Die Heizungsanlage sollte auf jeden Fall mit einem Energiezähler (mindestens beim Erdgasanschluss) versehen werden. Nur so können Energie-Massnahmen auf Ihre Effizienz geprüft und überwacht werden.

Der Betrieb sollte unbedingt die Heizkurven der Heizungsanlage optimieren. Die Heizgrenze sollte auf 12°C gesenkt werden. Die Vorlauftemperatur kann über eine Heizsaison schrittweise um jeweils 5 K abgesenkt werden. Der optimale Betriebspunkt, d.h. die Behaglichkeit in den Büros soll gewährleistet sein, muss "ertastet" werden. Am Wochenende soll die Heizungsanlage auf 18°C Raumtemperatur gesenkt werden. Typischerweise kann mit einer solchen Betriebsoptimierung gegen 10%, im Betrieb 200 MWh, Energie eingespart werden. Dies ohne teure Investitionen auszulösen.

Im Betrieb werden heute zwei Druckluft-WRG für die Heizung verwendet. Mit einer WRG-Menge von rund 500 MWh/a und Laufzeiten von ca. 4'000 h (Abbildung 11) funktionieren diese Anlagen sehr gut. Weitere Druckluft-WRG sind bereits geplant. Dies macht auf jeden Fall Sinn. Den Druckluft-WRG sollte erste Priorität eingeräumt werden. Mit dem weiteren Ausbau der Anlagen können mindestens weitere 250 MWh/a Energie zurückgewonnen werden.

Aus heutiger Sicht würde eine WRG der Rauchgase nur beim grössten Ofen 2x1 Sinn machen. Das Problem ist aber, dass sich der Ofen in den Hallen Ost befindet. Der Heizenergiebedarf die Heizung Ost (ca. 90 MWh) ist viel zu klein, um eine effiziente WRG zu betreiben. Einzige Möglichkeit wäre, den Ofen mit der Heizungsanlage West zu koppeln. Der Aufwand für eine solche Installation, die mindestens 300 m Leitung erfordern würde, wäre jedoch exorbitant hoch. Ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis wäre eher schwierig zu erreichen.

Beim Schmelzofen 2x3 ist heute bereits eine WRG installiert. Diese funktioniert heute nicht richtig bzw. wurde mit einer zu kleinen WRG-Fläche dimensioniert. Die Anlage wurde auf Rauchgastemperaturen von 450°C dimensioniert. Im heutigen Durchschnitt sind eher 200°C die Regel. Die Fläche ist wahrscheinlich gut 50% zu klein! Heute nutzt die Anlage ca. 70 MWh/a der Rauchgase zur WRG. Möglich wäre das Doppelte, ca. 130 MWh/a. Es sollte geprüft werden, ob die WRG-Fläche vergrössert werden kann. Es wird empfohlen, die WRG und den Rauchgas-Massenstrom in der nächsten Heizsaison zu messen und zu validieren. Nur mit diesen Grundlagen kann die mit einer sehr aufwändigen Installation realisierten WRG (2011) optimal dimensioniert werden.

### 5.4 Wärmepumpe Heizungsanlage

Eine Wärmepumpe für die Heizungsanlage sollte vom Betrieb genauer geprüft, d.h. gemessen und validiert, werden. Die Erdgaseinsparung von ca. 850-1'100 MWh/a entspricht ca. 55-60% vom Heizenergiebedarf.

Der Betrieb sollte davon ausgehen, dass die Druckluft-WRG in Zukunft mindestens 750 MWh/a Energie ins Heizungsnetz einspeisen. Ausserdem kommen von der (optimierten) Rauchgas-WRG vom Ofen 2x3 150 MWh/a hinzu. Die WRG sollen (in erster Priorität) lange Laufzeiten aufweisen, also dann laufen, wenn die Vorlauftemperaturen tief bzw. die Aussentemperaturen hoch sind (vgl. Abbildung 21 im Anhang A.3).

Die Wärmepumpe muss somit in zweiter Priorität zu den WRG ab einer Aussentemperatur von ca. 10°C arbeiten (vgl. Abbildung 21 im Anhang A.3).

Die Machbarkeit einer Wärmepumpe muss in einer Machbarkeitsstudie genau geprüft werden. Es gilt, die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für einen effizienten Betrieb einer solchen Anlage sicher zu stellen.

## 5.5 Fernwärme-/kälte

Die Wärmeleistung der Rauchgase könnte im Betrieb, anstelle von interner WRG, in ein Fernwärmenetz eingespeist werden. Technisch, unter Verwendung eines grösseren Pufferspeichers, wäre dies möglich. Das Temperaturniveau könnte dem Verbraucher angepasst, entweder als warme Fernwärme oder als kalte Fernwärme betrieben werden. Letztere würde eine WRG-Leistung von 250 kW aufweisen. Die warme Fernwärme 190 kW. Bei 6'070 h Betriebszeit gäbe des Energiemengen von 1'500 MWh/a bei kalter- bzw. 1'100 MWh/a bei warmer Fernwärme.

Könnte zusätzlich zu der Energiemenge der Rauchgase die Rückkühlung der Maschinen mittels Fernkälte erfolgen, würde sich die potenzielle Energiemenge auf rund 5'700 MWh/a erhöhen.

Aus Sicht vom Betrieb und auch vom Energienetz St.Gallen wäre die Variante kalte Fernwärme bzw. Fernkälte sicher die interessanteste Option einer externen WRG.

Damit die aufgeführten Energiezahlen erreicht werden können, muss auf jeden Fall eine Bedingung erfüllt sein: Das Energienetz muss das ganze Jahr, mindestens 6'000 h/a, Energie beziehen. Nur so kann eine Fernwärme oder Fernkälte Wärmepreise in der Nähe der internen WRG-Massnahmen aufweisen und ein sinnvolles Kosten-Nutzen-Verhältnis generieren.

Der Wärmepreis der Fernwärme bzw. -kälte hängt von verschiedenen Parametern ab, die zum heutigen Zeitpunkt nicht bekannt sind:

- Anzahl Energiebezüger
- Energiebedarf der Bezüger
- Untergrund und Leitungslänge der Trasse
- Betreiber der Fernwärme oder Fernkälte bzw. dessen Anschlussbedingungen

Für eine kalte Fernwärme muss ausserdem sichergestellt sein, dass die Verbraucher für tiefe Temperaturen Verwendung finden, z.B. mittels Wärmepumpe.

Diese offenen Parameter entscheiden die Machbarkeit einer Fernwärme im Betrieb bzw. vom Energienetz St.Gallen. Sie müssen in einer detaillierten Vorstudie eruiert werden.

## 5.6 ORC / Climeworks

Eine ORC-Anlage zur Stromproduktion oder Climeworks-Anlage zum Verkauf von CO<sub>2</sub>, sollte für den Betrieb letzte Priorität haben. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis dieser Massnahmen wird als sehr tief eingeschätzt.

Eine ORC-Anlage sollte nur in Betracht gezogen werden, wenn alle anderen Massnahmen technisch und wirtschaftlich nicht umsetzbar sind.

Die Climeworks-Anlage muss als Prototyp betrachtet werden. Der Entwicklungsstand der Anlagen ist in den Kinderschuhen. Eine solche Anlage kann aus wirtschaftlicher Sicht für den Betrieb nur in Zusammenarbeit, z.B. mit den SGSW und/oder dem BFE, erfolgen.

## Anhang

### A.1 Prinzipschemata

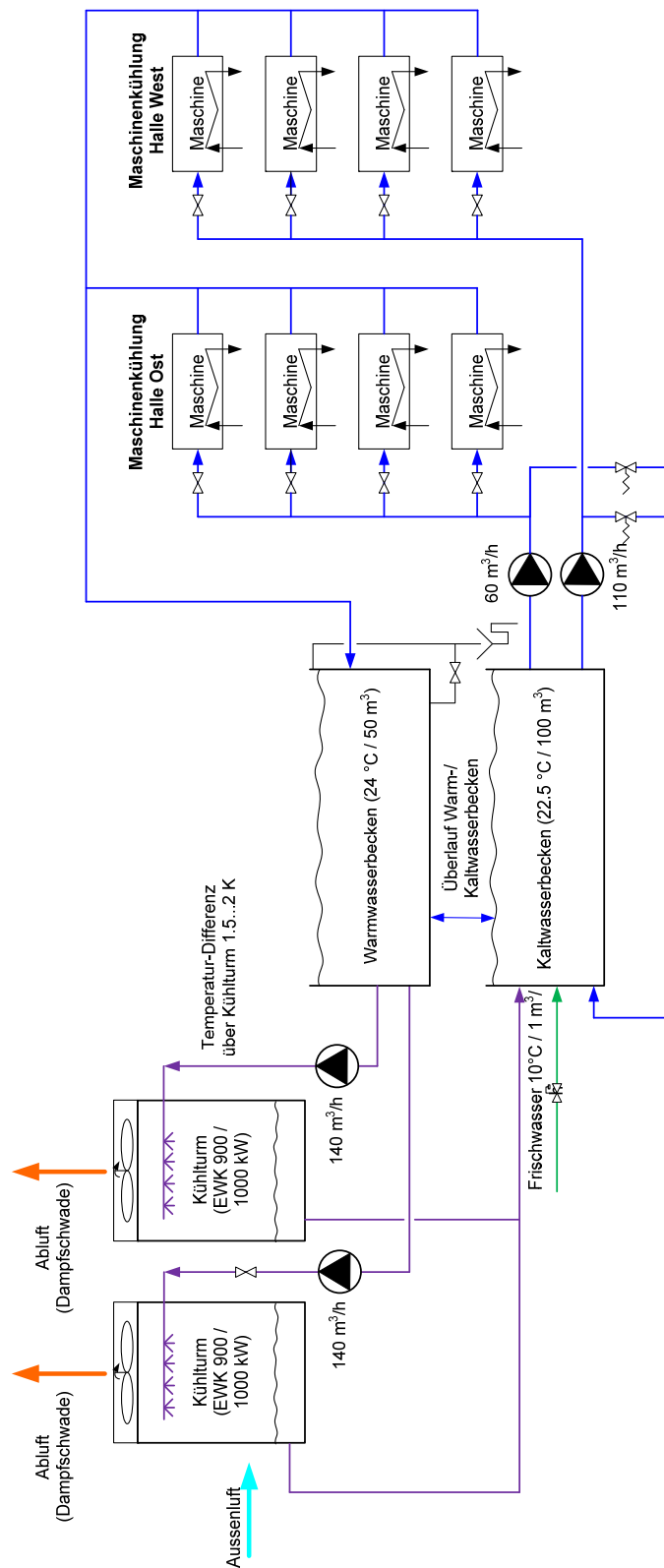


Abbildung 17: Prinzipschema Kühlanlage, Druckgussmaschinen, heutige Anlage

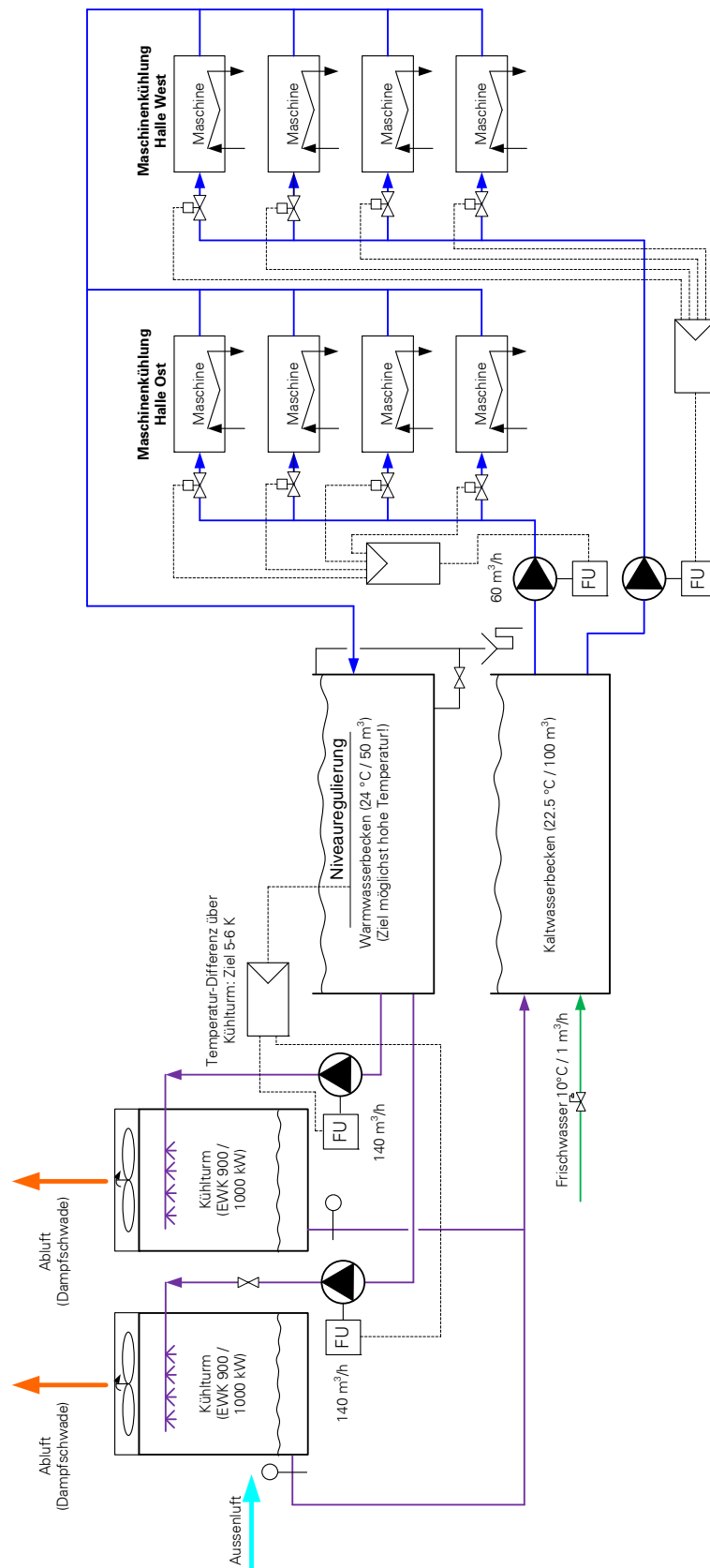


Abbildung 18: Prinzipschema Kühlenanlage, Druckgussmaschinen, optimierte Anlage

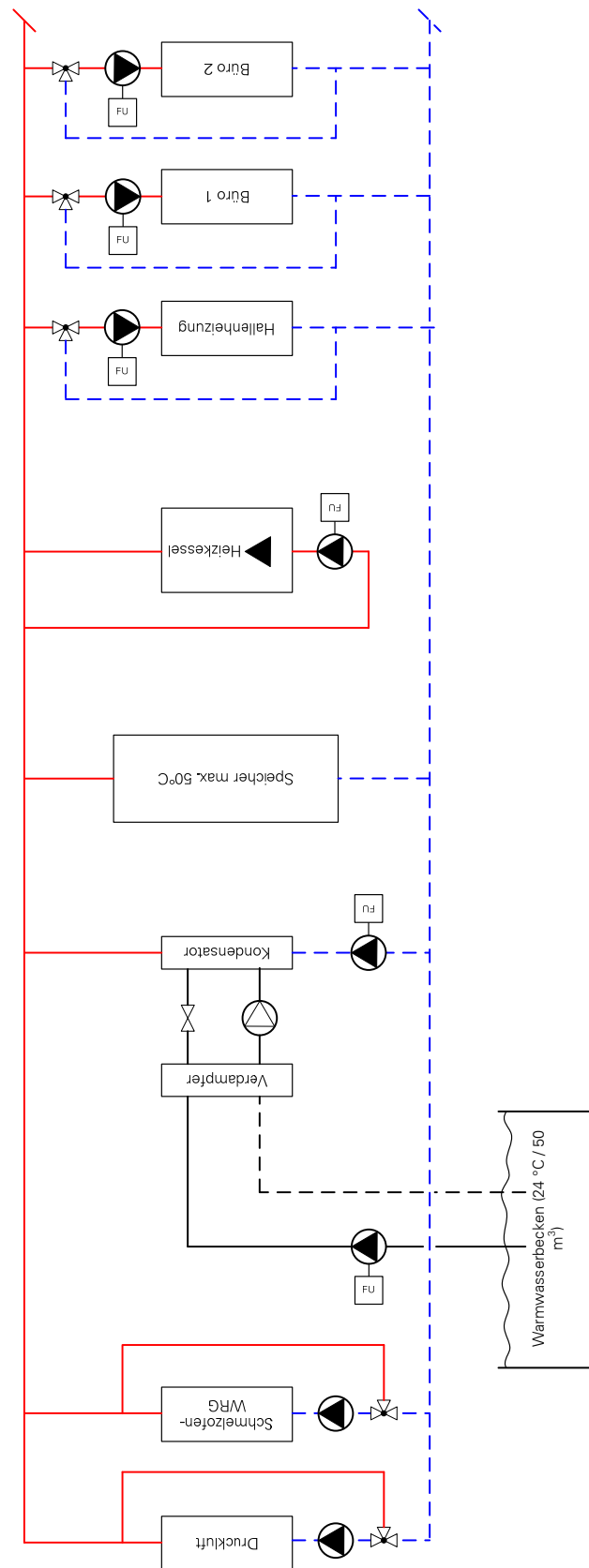


Abbildung 19: Prinzipschema Heizungsanlage mit WRG und Wärmepumpe

## A.2 Stromdaten Pinch-Analyse

Name	Segment	Hot/Cold	Tin (°C)	Tout (°C)	Flow (kg/s)	Cp (kJ/kgK)	Fluid	Feuchte (g/kg)	tStart (h)	tStop (h)
2x1 Rauchgas (inkl. Falschluff, d.h. Lambda 3,5)		Hot	280	20	0.42	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x2 Rauchgas (inkl. Falschluff, d.h. Lambda 4)		Hot	200	20	0.23	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x3 Rauchgas (inkl. Falschluff, d.h. Lambda 4)		Hot	200	20	0.36	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x4 Rauchgas (inkl. Falschluff, d.h. Lambda 4)		Hot	220	20	0.19	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x1 Zuluft		Cold	8	800	0.2	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x2 Ost Zuluft		Cold	8	800	0.1	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x3 Zuluft		Cold	8	800	0.13	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x4 Zuluft		Cold	8	800	0.08	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
Heizung ta<4°C		Cold	70	80	10.71653664	4.199117623	Water		0	2500
Maschinenkühlung		Hot	24	22.5	47	4.210200215	Water		0	6070
Druckluft		Hot	70	63	7.115835841	4.206723938	Water		0	4000
2x1 Aluminium										
	1	Cold	20	660	0.186	0.897	Aluminium		0	6070
	2	Cold	660	661	0.186	398	Aluminium		0	6070
	3	Cold	661	740	0.186	0.897	Aluminium		0	6070
2x2 Aluminium										
	1	Cold	20	660	0.08	0.897	Aluminium		0	6070
	2	Cold	660	661	0.08	398	Aluminium		0	6070
	3	Cold	661	740	0.08	0.897	Aluminium		0	6070
2x3 Aluminium										
	1	Cold	20	660	0.14	0.897	Aluminium		0	6070
	2	Cold	660	661	0.14	398	Aluminium		0	6070
	3	Cold	661	740	0.14	0.897	Aluminium		0	6070
2x4 Aluminium										
	1	Cold	20	660	0.016	0.897	Aluminium		0	6070
	2	Cold	660	661	0.016	398	Aluminium		0	6070
	3	Cold	661	740	0.016	0.897	Aluminium		0	6070
Heizung ta<4-9°C		Cold	52	60	7.413420157	4.215328329	Water		2500	4500
Heizung ta<9-14°C		Cold	42	50	6.664352099	4.220215196	Water		4500	6070
Wärmebehandlung (Aluminium aufheizen) Kammer 1		Cold	20	460	1.013479274	0.897	Aluminium		0	6070
Wärmebehandlung (Aluminium aufheizen) Kammer 2		Cold	20	260	0.929022668	0.897	Aluminium		0	6070
Wärmebehandlung_xx (Abluftstrom)		Hot	60	20	6.895546265	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
Pfannenvorwärmstationen		Cold	20	700	1.045751634	0.45	-		0	6070
Wärmebehandlung_xx (2010) (Abluftstrom)		Hot	60	20	5.491810061	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
Wärmebehandlung_xx (2014) (Abluftstrom)		Hot	60	20	5.491810061	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x1 Verluste		Cold	740	741	70	3	Simple		0	6070
2x2 Verluste		Cold	740	741	40	3	Simple		0	6070
2x3 Verluste		Cold	740	741	53.33333333	3	Simple		0	6070
2x4 Verluste		Cold	740	741	33.33333333	3	Simple		0	6070
2x1 Zuluft auf 150°C		Cold	8	150	0.2	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x2 Zuluft auf 150°C		Cold	8	150	0.1	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x3 West Zuluft auf 150°C		Cold	8	150	0.13	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070
2x4 Zuluft auf 150°C		Cold	8	150	0.08	1.015148	HumidAir	0.006	0	6070

Tabelle 15: Stromtabelle der Pinch-Analyse, ganzes Areal, Betriebszeit 6'070 h



### A.3 Heizkurve

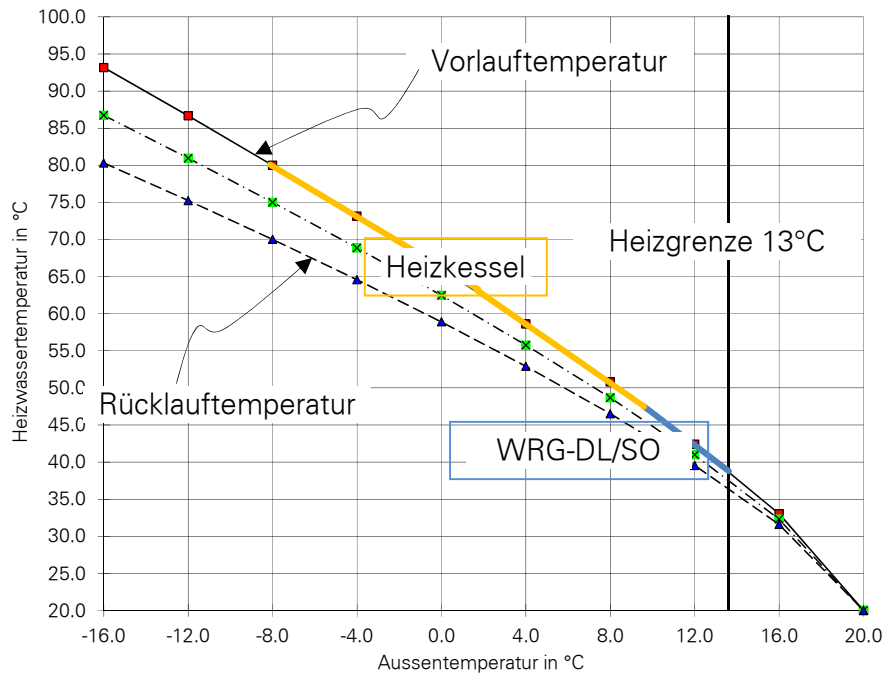


Abbildung 20: Heizkurve der Heizungsanlage im Betrieb (Ist-Zustand), VL/RL 80/70°C, Auslegung -8/20°C

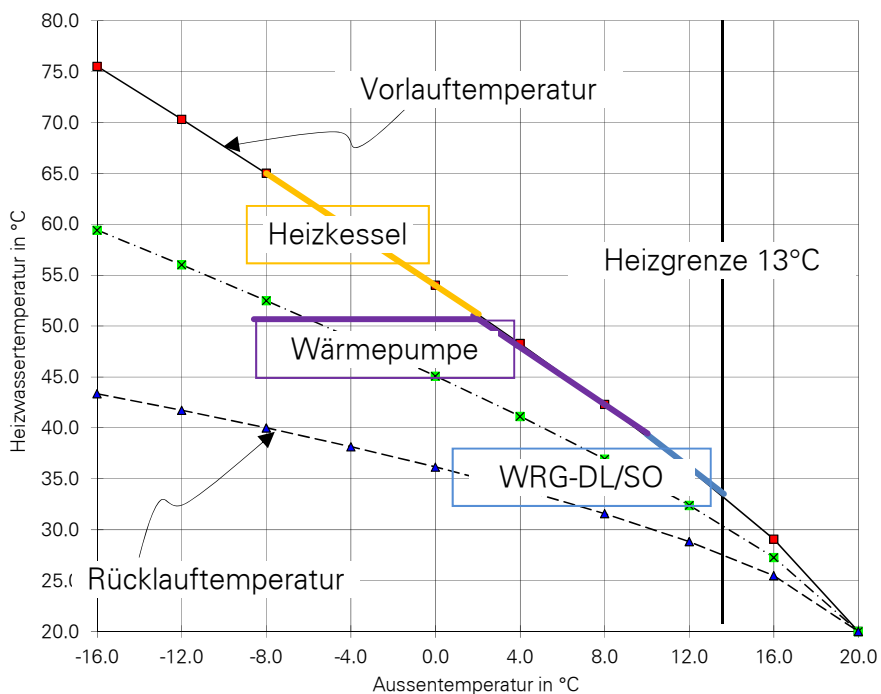


Abbildung 21: Heizkurve der Heizungsanlage im Betrieb mit Wärmepumpe, VL/RL 65/40°C, Auslegung -8/20°C