



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Bereich Prozess- und Betriebsoptimierung (PBO)

ENERGIEANALYSE MIT DER PINCH-METHODE

HOCHDORF NUTRITEC AG

ENERGIE- UND PRODUKTIONSKOSTEN- SENKUNG

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Florian Brunner; florian.brunner@helbling.ch

Raymond Morand; raymond.morand@helbling.ch

Helbling Beratung + Bauplanung AG

Hohlstrasse 614, 8048 Zürich

www.helbling.ch



Impressum

Datum: 28. April 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Bereich Prozess- und Betriebsoptimierung (PBO)

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

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

www.bfe.admin.ch

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

Projektnummer: 102443

Bezugsort der Publikation: www.energieschweiz.ch (Rubrik Unternehmen)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Ausgangslage	4
2 Ziel der Arbeit	4
3 Lösungsweg.....	5
3.1 Übersicht.....	5
3.2 Vorgehen Schritt für Schritt.....	6
3.3 Definition von Ersatzströmen.....	6
4 Ergebnisse.....	7
4.1 Verwendete Grundlagen.....	7
4.2 Ist-Analyse	7
4.3 Definition der Betriebsfälle.....	8
4.4 Energiebilanz 2007/2008	9
4.5 Optimierungskonzept des Werks.....	10
4.6 Pinch-Analyse	11
4.7 Massnahmen	13
4.8 Resultate.....	17
4.9 Empfehlungen, weiteres Vorgehen	18
5 Schlussfolgerungen	19
Anhang.....	20
A Massnahmentabelle und Prinzipschemata Basisvariante	
B Auslegung der Wärmetauscher	
C Definition energetischer Optimierungsgrad	

Verzeichnis der Grafiken

Grafik 1	<i>Beschreibung des Lösungswegs von der Ist-Situation bis zur Umsetzung.....</i>	5
Grafik 2	<i>Milchpulverproduktion am Beispiel von Babyfood, Linie 8 (thermisch relevanter Teil).</i>	6
Grafik 3	<i>Energetische Referenz-Betriebsfälle für die Produktion in der Linie 5 und 8.</i>	8
Grafik 4	<i>Pinch-Analyse: Composite Curves und Kostenkurve</i>	11
Grafik 5	<i>Ausschnitt aus dem Netzwerk der Variante 3.....</i>	12
Grafik 6	<i>Prinzipschema der Massnahmen der Variante 2, Linie 8.....</i>	15
Grafik 7	<i>Prinzipschema der Massnahmen der Variante 2, Linie 5.....</i>	16

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	<i>Berechnungsgrundlagen: Wirtschaftsdaten und Auslegungszustände</i>	7
Tabelle 2	<i>Primärenergieverbrauch im Jahr 2007/2008.....</i>	9
Tabelle 3	<i>Massnahmentabelle Variante 2</i>	14

Zusammenfassung

Hochdorf Nutritec AG plant für das Jahr 2008/2009 grosse Erweiterungen und Sanierungen in Sulgen im Umfang von ca. 50 Mio. CHF. Vorgesehen sind die Sanierung der Linie 5 und der Neubau der Linie 8. In der Linie 5 werden 20'000 Liter Molke oder 18'000 Liter Magermilch pro Stunde in einem Eindampfer und einem Hochkonzentrator aufkonzentriert. Bei der Verarbeitung von Molke wird zusätzlich in einem Kristallisator die Lactose kristallisiert. In dem sanierten Sprühturm 5 werden danach aus dem Milchkonzentrat rund 1'600 Kilo Milchpulver pro Stunde produziert. In der Linie 8 kann wahlweise Milchpulver für Babyfood (BF) aus Magermilchkonzentrat (ca. 10'000kg/h) oder Milchpulver aus Magermilch/Vollmilch hergestellt werden. Im Vollbetrieb wird die Linie 8 3'500 kg Milchpulver pro Stunde produzieren können. Die energetisch relevanten Produktionsschritte sind dabei Nassmischung (nur im Falle von Babyfood), UHT-Behandlung, Eindampfung, Hochkonzentrierung und Versprühung im Sprühturm zur Pulverproduktion.

Erdgas als Primärenergie machte im Jahr 2007 mit 58 GWh_{th} 88 % des Energieverbrauchs der Nutritec aus. Der Energiebedarf wird in allen Anlagen über ein gesamtheitliches Frischdampfnetz gedeckt. Die Erweiterungen und Sanierungen stellen die Energiezentrale wahrscheinlich vor ein Problem betreffend Dampfversorgung, was zu bedeutenden Zusatzinvestitionen sowie Zeitrissen bezüglich Produktionsstart im Frühjahr 09 führen könnte. Eine optimale Einbettung der Erweiterungen in die Dampfversorgung soll unter anderem Investitionen im Dampfbereich verringern.

Im Schwerpunkt wurde die geplante Sanierung bzw. der Neubau betrachtet, wobei am Rande auch die Dampfversorgung, das CIP (Cleaning In Place) und die Milchaufbereitung (UHT-Behandlung) berücksichtigt wurden. Der Zeitdruck und die laufenden Änderungen des Pflichtenhefts der Anlagen machten eine enge Zusammenarbeit und einen reibungslosen Informationsaustausch mit dem Kunden und vor allem dem Anlagenbauer nötig.

Die Studie wurde innerhalb eines Monats während des Preengineering mit der systematischen Methode der Pinch-Analyse durchgeführt. Die Pinch-Methode ist das wichtigste und bisher am weitesten entwickelte Instrument der Prozessintegration. Sie ermöglicht, ausgehend von Prozessanforderungen, die Berechnung des physikalisch notwendigen minimalen Energieeinsatzes der Prozesse.

Der vorliegende Bericht präsentiert einen Mix aus optimaler Energierückgewinnung und maximaler Wirtschaftlichkeit in der Umsetzung. Häufig ist die energetisch optimale Lösung aus wirtschaftlichen oder auch technischen Gründen nicht realisierbar. Trotzdem kann Sie aber für andere Betriebe durchaus Sinn machen. Aus diesem Grund sind im Bericht nicht nur die wirtschaftlichen, sondern auch ein Teil der eher unwirtschaftlichen Massnahmen erwähnt, damit ein besserer Gesamtüberblick über das Wesen der Pinch-Studie und deren Resultate gewährt werden kann.

Die Studie hat neue Einsparpotentiale aufgezeigt und einige der bereits geplanten Massnahmen des Kunden als energetisch optimal bestätigt. Die Massnahmen sind klassische prozessinterne Wärmerückgewinnungen und haben alle hohe Betriebszeiten und entsprechend hohe Einsparungen gemein. Bei einem Payback von maximal 5 Jahren pro Massnahme können zusätzlich zu den geplanten Wärmerückgewinnungen Einsparungen von rund 3'640 MWh_{th} respektive knapp 210'000 CHF pro Jahr realisiert werden. Die Wärmerückgewinnung kann absolut gesehen von den geplanten 14.2 GWh_{th} auf 17.8 GWh_{th} erhöht werden. Damit werden bei Investitionskosten von ca. 2.4 Mio CHF über eine Million CHF Energiekosten pro Jahr eingespart. Die Einsparungen wirken sich 1:1 aus auf den Erdgasverbrauch aus, der um etwa 1.77 Mio m³ pro Jahr verringert wird. Ein CO₂-Ausstoss von rund 3'500 Tonnen pro Jahr kann dadurch vermieden werden.

Die vorliegende Studie wurde vom Bundesamtes für Energie (BFE) im Rahmen des Pinch-Programms finanziell unterstützt. Wir danken dem BFE dafür.

1 Ausgangslage

Hochdorf Nutritec AG (Nutritec) plant für das Jahr 2008/2009 grosse Erweiterungen und Sanierungen in Sulgen im Umfang von ca. 50 Mio. CHF. Vorgesehen sind die Sanierung der Linie 5 und der Neubau der Linie 8. In der Linie 5 werden 20'000 Liter Molke oder 18'000 Liter Magermilch pro Stunde in einem Eindampfer und einem Hochkonzentrator aufkonzentriert. Bei der Verarbeitung von Molke wird zusätzlich in einem Kristallisator die Lactose kristallisiert. In dem sanierten Sprühturm 5 werden danach aus dem Milchkonzentrat rund 1'600 Kilo Milchpulver pro Stunde produziert. In der Linie 8 kann wahlweise Milchpulver für Babyfood (BF) aus Magermilchkonzentrat (ca. 10'000kg/h) oder Milchpulver aus Magermilch(MM)/Vollmilch(VM) hergestellt werden. Im Vollbetrieb wird die Linie 8 3'500 kg Milchpulver pro Stunde produzieren können. Die energetisch relevanten Produktionsschritte sind dabei Nassmischung (nur im Falle von Babyfood), UHT-Behandlung, Eindampfung, Hochkonzentrierung und Versprühung im Sprühturm zur Pulverproduktion.

Erdgas als Primärenergie macht mit 58 GWh_{th} 88 % des Energieverbrauchs der Nutritec aus. Der Energiebedarf wird in allen Anlagen über ein gesamtheitliches Frischdampfnetz gedeckt. Die Erweiterungen und Sanierungen stellen die Energiezentrale wahrscheinlich vor ein Problem betreffend Dampfversorgung, was zu bedeutenden Zusatzinvestitionen sowie Zeitrisiken bezüglich Produktionsstart im Frühjahr 09 führen könnte. Eine optimale Einbettung der Erweiterungen in die Dampfversorgung soll unter anderem Investitionen im Dampfbereich verringern / vermeiden.

Die steigenden Energiepreise erhöhen den Anteil der Energiekosten an der Produktion stetig. Eine Reduktion des Energieverbrauchs verringert die Energiekosten und hilft, die CO₂-Zielvereinbarungen einzuhalten.

Eine Pinch-Analyse als begleitendes Instrument in der Projektierungsphase bietet gegenüber einem Retrofit einer bestehenden Anlage entscheidende Vorteile. Erstens ermöglicht sie von Beginn an eine energetisch optimierte Produktionsanlage, d.h. Effizienzpotentiale können von Anfang an 1:1 umgesetzt werden (keine Umbauten/Anpassungen nötig). Zweitens ist die Datengrundlage im Allgemeinen nach dem Preengineering klar, es ist somit weniger Aufwand zur Datenerhebung notwendig und allfällige Optimierungsmassnahmen können direkt vor Ort mit dem Anlagenbauer besprochen werden.

Da die Rezepte und Prozessdaten der zwei betrachteten Milchpulveranlagen der Geheimhaltungsvereinbarung unterliegen, sind in diesem Bericht die detaillierten Auslegungsdaten nicht abgedruckt. Der Bericht versucht aber trotzdem, die betrachteten Prozesse sowie das Wesen der Pinch-Analyse von der Datenbeschaffung bis zur Erarbeitung der Massnahmen so verständlich wie möglich zu erläutern.

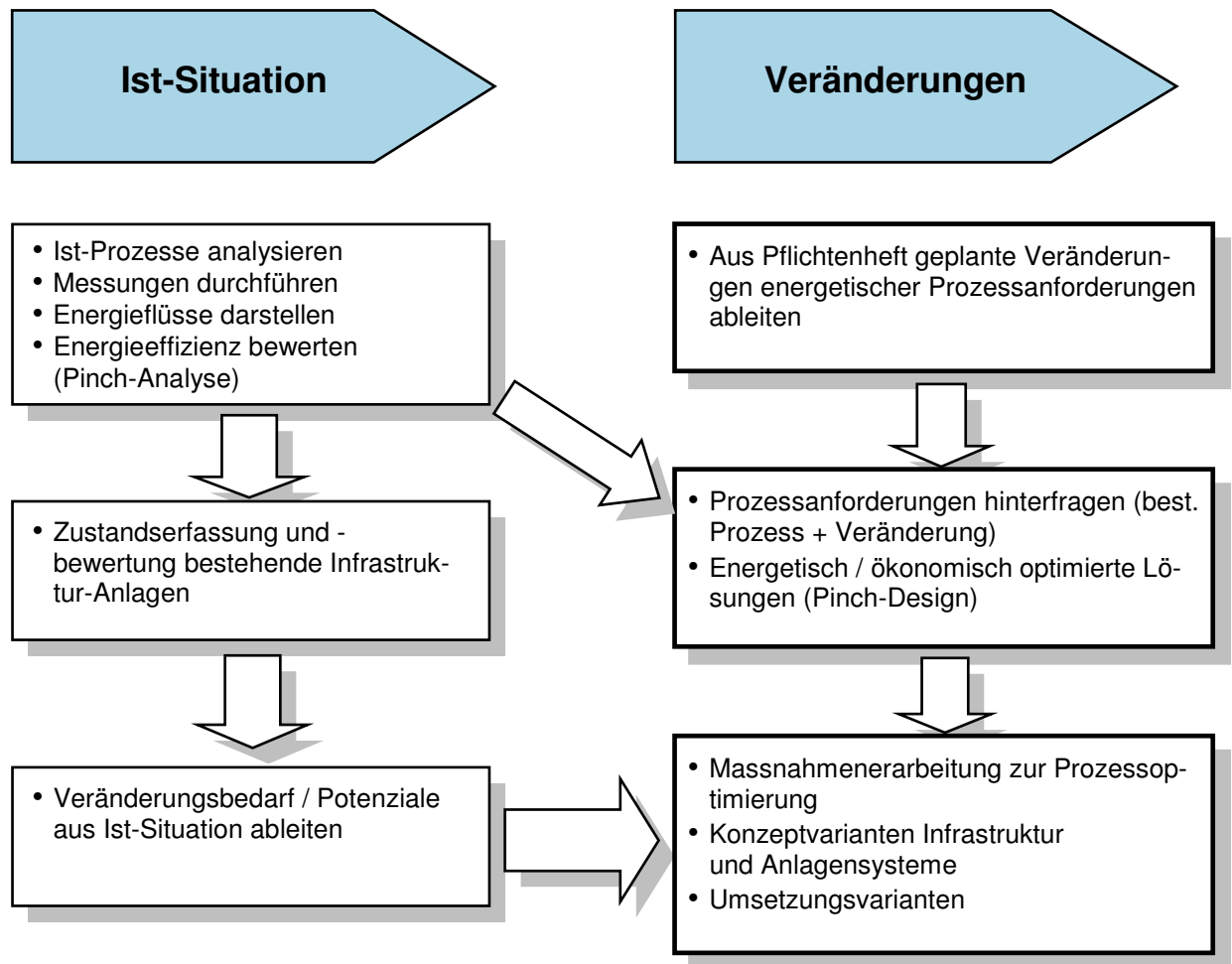
2 Ziel der Arbeit

Im Auftrag sind die folgenden Zielsetzungen der Studie festgehalten:

- Aufzeigen der Energieeinsparpotenziale in den wichtigsten energierelevanten Prozessen der Linie 5 und der Linie 8.
- Erarbeitung von Massnahmen zur Erschliessung der Potenziale mit Priorisierung, Darstellung der Wirkung und überschlägiger Berechnung der Wirtschaftlichkeit.
- Erarbeitung einer energetischen Optimierungskonzepts der Erweiterung und der Sanierung und deren Einbettung in die Produktion.
- Vermeiden / Minimieren von Investitionen bzgl. Energiezentrale / Dampfkapazität.
- Reduktion der Energiekosten resp. Einhaltung von Zielvereinbarungen und allenfalls Übererfüllung mit entsprechenden weiterführenden Optionen.

3 Lösungsweg

3.1 Übersicht



Grafik 1 Beschreibung des Lösungswegs von der Ist-Situation bis zur Umsetzung.
Fette Boxen: Schwerpunkte dieser Studie.

Grafik 1 zeigt eine Übersicht über den Lösungsweg der Pinch-Studie. Da in dieser Studie der Schwerpunkt auf der geplanten Sanierung und dem Neuprojekt lag, bestand der Hauptteil der Datenbeschaffung aus der Ableitung der energetischen Prozessanforderungen aus den Pflichtenheften der geplanten Anlagen. Die Ist-Situation war vor allem in Bezug auf die Dampfversorgung, die vorgelagerten Prozesse (z.B. UHT-Behandlung) und die Reinigung relevant (CIP).

3.2 Vorgehen Schritt für Schritt

Nachfolgend wird das Vorgehen im Einzelnen beschrieben:

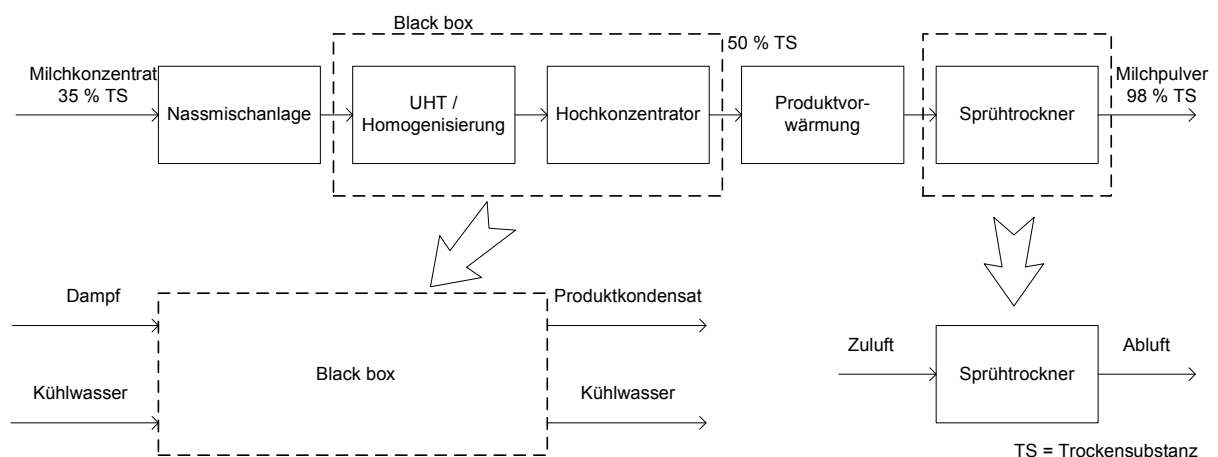
1. Definition der Betriebsfälle
2. Datenaufnahme von Produktion (Linie 5 und Linie 8) und Energieversorgung inkl. vorgelagerte UHT-Behandlung und CIP (Cleaning In Place).
3. Messung von fehlenden Energiekennzahlen (UHT-Behandlung, CIP).
4. Aufbau von Energie- und Massenbilanzen.
5. Energiemodellierung der Prozessbedingungen, Definition von Ersatzströmen (siehe Kap. 3.3).
6. Hinterfragen der Prozessbedingungen und Definition der Prozessanforderungen zusammen mit den Prozessspezialisten der Kundenfirma.
7. Pinch-Berechnungen inkl. Wirtschaftlichkeitsdaten, mehrfaches iteratives Vorgehen.
8. Berechnung der ersten Pinchkurven (Composite Curves).
9. Erstes Netzwerkdesign zeigt die theoretisch optimale Nutzung aller Abwärmeströme; Einige der Massnahmen sind in der Praxis nicht umsetzbar (Platzverhältnisse, Wirtschaftlichkeit etc.)
10. Zweites Netzwerkdesign, das so nah wie möglich am ersten Netzwerkdesign ansetzt und die wirtschaftliche und technische Umsetzbarkeit der Massnahmen berücksichtigt.

3.3 Definition von Ersatzströmen

Die Definition von Ersatzströmen ist dann nötig, wenn die direkte Modellierung mit Produktströmen entweder unmöglich oder nicht sinnvoll ist. Eine allfällige Optimierung zielt dann auf diese Ersatzströme, nicht auf die Produktströme selber. In diesem Projekt wurden zwei Prozesse mit Ersatzströmen definiert.

Da vom Anlagenbauer die UHT-Behandlung, die Homogenisierung wie auch die Hochkonzentrierung als Einheit vorgegeben wurden, mussten diese Behandlungsschritte als Black box betrachtet werden. Innerhalb der Black box sind die genauen Prozessbedingungen nicht bekannt. Die energetischen Anforderungen an die Prozesse werden nicht über das Produkt beschrieben, sondern alleine durch den Input und Output von Versorgungsströmen definiert. Konkret heisst das, dass anstelle von Milchkonzentrat (Aufheizen, Abkühlen, Hochkonzentrieren) Dampf, Kühlwasser und Produktkondensat ins Modell aufgenommen werden.

Im Falle des Sprühtrockners wurden anstelle des Produktstroms „Milchpulver“ die Hilfsströme „Zuluft“ und „Abluft“ eingesetzt. Das heisst, dass der Sprühtrockner als Trocknungsanlage akzeptiert und die Betriebsbedingungen übernommen werden. Eine allfällige Optimierung wird also keine Änderungen der Betriebsbedingungen im Sprühtrockner, sondern eine regenerative Vorwärmung der Zuluft und/oder eine energetische Nutzung der Abluft vorschlagen.



Grafik 2 Milchpulverproduktion am Beispiel von Babyfood, Linie 8 (thermisch relevanter Teil).

4 Ergebnisse

4.1 Verwendete Grundlagen

Wärmepreis als Dampf (Grenzkosten)	ca. 6 Rp./kWh _{th} (Erdgas)
Strompreis (Grenzkosten/Absolut)	Ca. 10.0 Rp./kWh _{el}
Wasserpreis inkl. Abwasser (absolut)	0.61 + 1.27 Fr./m ³
Interner Zinssatz	8.0 % p.a.
Teuerung aus Wärme // Strom	3.0 % p.a. (letzte 15a) // 5.0 % p.a.
Investitionskriterium Produktionsanlagen	5.0 a (max. Payback)
Amortisationszeit Produktionsanlagen (min.)	10.0 a
Berechnungsfall für Dimensionierung (Linie 5 // Linie 8)	Molke // Babyfood
Betriebszeiten Linie 5	4'000 h/a Molke, 2'000 h/a MM
Betriebszeiten Linie 8	4'000 h/a Babyfood, 2'000 h/a MM
Betriebszeiten Vorwärmung Aussenluft Sprühturm Linie 5 und Linie 8	1'500 h/a
Produktion L5 // L8 2007 (netto)	6'000 // 20'000 t/a

Tabelle 1 Berechnungsgrundlagen: Wirtschaftsdaten und Auslegungszustände

Folgende Unterlagen wurden für diese Studie verwendet:

- Berichte von Niro, diverse Schemata, Pläne, Offerten, Datensammlungen, zur Verfügung gestellt von der Firma Niro
- Angaben zu Infrastruktur, Rahmenbedingungen wie Energiepreise, Zinsen etc. von Nutritec.

4.2 Ist-Analyse

Pasteurisation, UHT-Behandlung

Die angelieferte Frischmilch wird entweder pasteurisiert oder UHT-behandelt. Die eingebauten Wärmetauscher erreichen ein relativ kleines delta T und eine Flächenvergrößerung hat bei den heutigen Energiepreisen keine Priorität.

Cleaning in Place (CIP)

Die Reinigungsprozesse verbrauchen zwar kurzfristig viel Dampf, der Energiebedarf fällt aber meist nur für kurze Zeit und/oder nicht sehr häufig an (Batchbetrieb). Um Wärme kontinuierlich zurückgewinnen zu können, wären zum Teil erhebliche Warmwasserspeicher notwendig. Erschwerend kommt hinzu, dass das benötigte Temperaturniveau (um 60 °C) verglichen mit der zur Verfügung stehenden Abwärme sehr hoch ist.

Dampfproduktion, Kondensat

- Die Speisewasservorwärmung funktioniert ausreichend gut: Die Rauchgase der Erdgasbrenner werden in den Economizern je nach Betriebszustand auf bis zu 50 °C abgekühlt und das Speisewasser entsprechend vorgewärmt. Es ist ein Wärmetauscher in Betrieb, um den Energieverlust im Speisewassertank (Ausgasung) zurückzugewinnen.
- Gegenwärtig operiert die Dampfversorgung an der Kapazitätsgrenze. Die Sanierung der Linie 5 wird zwar zu wesentlichen Dampfeinsparungen führen, die Versorgungskapazität wird aber voraussichtlich mit der zusätzlichen Linie 8 erreicht/überschritten. Zusätzliche Dampfeinsparungen können eventuell einen Ausbau der Dampfversorgung verhindern; als Alternative kann ein Teil der Energie für die Zulufterwärmung des Sprühtrockners durch einen separaten Gasbrenner zur Verfügung gestellt werden.

Elektrizität

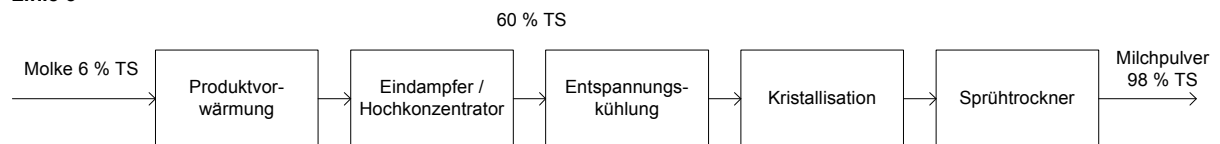
- Die grössten Stromverbraucher im Werk Sulgen sind die Ventilatoren, die Homogenisatoren und die mechanische Brüdenkompression.
- Praktisch alle grösseren Motoren sind mit einem Frequenzumrichter ausgerüstet.

4.3 Definition der Betriebsfälle

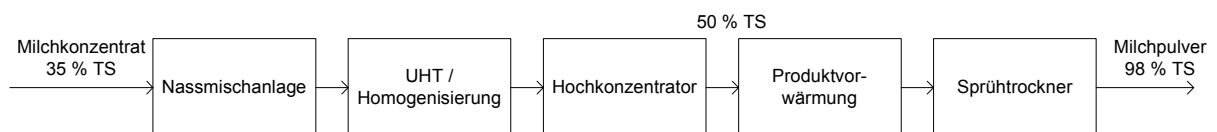
Der Schwerpunkt der Arbeit lag bei der energetischen Optimierung und optimalen Einbettung der zu sanierenden Linie 5 und der neuen Linie 8.

Auf beiden Linien können unterschiedliche Produkte gefahren werden, die in ihrer Produktion verschieden sind. In der Linie 5 wird zum Beispiel je nach Produkt die Kristallisation gebraucht/nicht gebraucht. In der Linie 8 ist die Nassmischanlage ausschliesslich für die Produktion von Babyfood in Betrieb, dafür ist bei der Milchpulverproduktion aus Voll- oder Magermilch ein Eindampfer zusätzlich zum Hochkonzentrator nötig.

Linie 5



Linie 8



Grafik 3 Energetische Referenz-Betriebsfälle für die Produktion in der Linie 5 (Molke) und der Linie 8 (Babyfood).

Für die energetische Modellierung werden Referenz-Betriebsfälle festgelegt; sie haben die längste Betriebszeit und den höchsten Energieverbrauch pro Jahr. Für die Linie 5 wurde die Produktion von Milchpulver aus Molke, für die Linie 8 die Produktion von Babyfood als Referenz bestimmt.

4.4 Energiebilanz 2007/2008

In Tabelle 2 ist der gemessene (2007) und voraussichtliche (2008) Energieverbrauch des Werks in Sulgen dargestellt. Die Anlagen im Umfang dieser Studie sind grau herausgehoben.

	2007	2008	
Primärenergie	67'790	1)	MWh/a
Strom	8'290	1)	MWh/a
Erdgas (Hu)	59'500	1)	MWh/a
Anlagen	Dampfverbrauch 2)		
Turm 1	0.5	-	t/h
Turm 3	1.0	1.0	t/h
Turm 4	2.0	2.0	t/h
Turm 5 (Linie 5)	3.3	2.5	t/h
Turm 6	0.5	0.5	t/h
Turm 8 (Linie 8)	-	8.0	t/h
Eindampfer 2	0.3	0.3	t/h
Eindampfer 3 (Linie 5)	3.9	0.3	t/h
Eindampfer/Hochkonzentrator (Linie 8)	-	2.0	t/h
Wet Mix Linie 8	-	4.0	t/h
Walzentrockner	3.0	3.0	t/h
Betrieb Allgemein	1.5 – 2.0	2.0	t/h
Summe	16.5	26.6	t/h

1) Noch nicht bekannt.

2) Bezogen auf Maximalbedarf pro Anlage, ohne Berücksichtigung der Betriebszeit.

Tabelle 2 Primärenergieverbrauch im Jahr 2007/2008

Rund 88 % des gesamten Primärenergiebedarfs wurde im Jahr 2007 über Erdgas erbracht. Die Einsparpotentiale liegen daher hauptsächlich im Bereich der thermischen Energie und die Reduktion des Stromverbrauchs spielt eine untergeordnete Rolle. Die Energieverbrauchszahlen im 2008 sind noch nicht genau prognostizierbar und hängen unter anderem von der Betriebszeit der einzelnen Linien, dem Produktmix und der umgesetzten Wärmerückgewinnung ab.

Der Anteil des thermischen Energieverbrauchs bezieht sich auf den Maximalbedarf der Anlagen bei entsprechender Produktion und entspricht daher nicht genau dem durchschnittlichen Jahresverbrauch. Da aber alle Anlagen ungefähr die gleiche Jahresbetriebszeit haben, lassen sich die Auswirkungen auf die Dampfversorgung bereits erahnen.

In der Linie 5 wird vor allem durch den Einsatz thermischer Brüdenkompression im Bereich des Eindampfers massiv Energie gespart, im Sprühturm der Linie 5 ist eine Wärmerückgewinnung vorgesehen. Die Einsparungen werden aber kaum reichen, um den stark steigenden Bedarf der neuen Linie 8 (ca. 14 t/h) zu kompensieren.

4.5 Optimierungskonzept des Werks

Die Suche nach Massnahmen zur Reduktion des Primärenergiebedarfs kann in 4 Prioritäten geordnet werden.

Ziel ist eine Erdgas-/ Stromeinsparung durch:

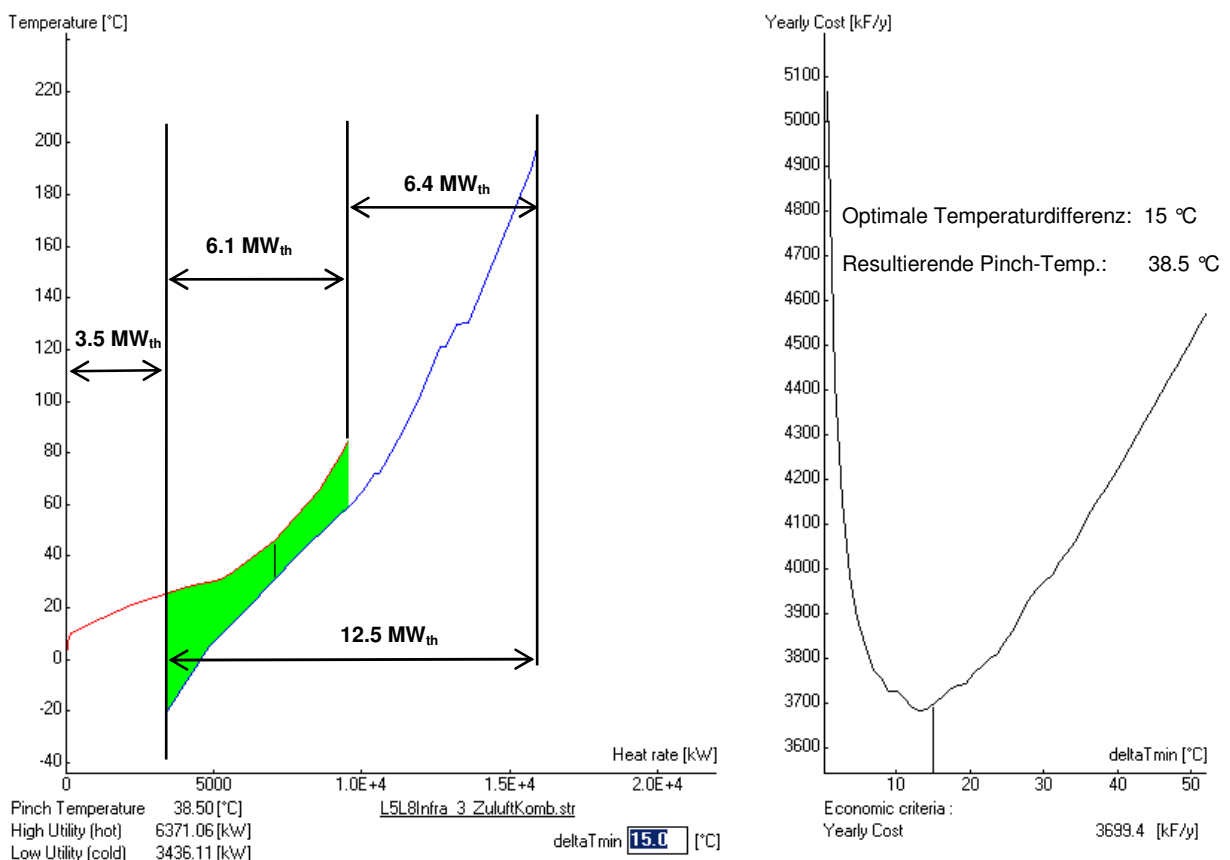
1. Kontinuierliche prozessinterne Wärmerückgewinnung innerhalb der Linie 5 und innerhalb der Linie 8, ausgehend von den Standard-Betriebsfällen. Standard-Betriebsfälle werden für die energetische Modellierung festgelegt, sie haben die längste Betriebszeit und den höchsten Energieverbrauch pro Jahr. Die Optimierungsmassnahmen werden für diese Fälle gerechnet und müssen mit den weiteren Betriebsfällen kompatibel sein.
2. Kontinuierliche prozessinterne Wärmerückgewinnung innerhalb der Linie 5 und innerhalb der Linie 8, ausgehend von allen weiteren Betriebsfällen.
3. Wärmerückgewinnung ausserhalb der beiden Linien (z.B. Vorwärmung von CIP-Wasser über Warmwasserspeicher).
4. Optimierung der vorgelagerten Prozesse wie zum Beispiel UHT-Behandlung, Pasteurisierung.

4.6 Pinch-Analyse

Die Pinch-Methode ist das wichtigste und bisher am weitesten entwickelte Instrument der Prozessintegration. Sie ermöglicht, ausgehend von Prozessanforderungen, die Berechnung des physikalisch notwendigen minimalen Energieeinsatzes der Prozesse. Sie erlaubt, bei bestehenden Anlagen den energetischen Optimierungsgrad festzustellen, Energiesparpotentiale aufzuzeigen und dient als Arbeitsinstrument zur Auslegung der vorgeschlagenen Änderungsmassnahmen.

Mit Hilfe der wirtschaftlichen Grundlagen (d.h. Investitionskosten und Betriebskosten, siehe Kapitel 4.1) und von thermodynamischen Werten wurde eine minimale Temperaturdifferenz von 15 °C ermittelt (siehe Grafik 4, rechts). Dies ist die Temperaturdifferenz zwischen kaltem und warmem Energiestrom, die in keinem der Wärmetauscher unterschritten wird. Die Pinch-Temperatur liegt dabei bei 38.5 °C.

Grafik 4 (links) zeigt die Composite Curves, d.h. die aufzuheizenden Ströme (blau) und die abzukühlenden Ströme (rot). Der grüne Teil markiert die Leistung (Projektion auf die x-Achse), die theoretisch mit Wärmerückgewinnung erbracht werden könnte.



Grafik 4 Pinch-Analyse: Composite Curves und Kostenkurve

In dieser Studie wurden Prozesse mit einem thermischen Heizwärmebedarf von 12.5 MW_{th} und einem Abwärmepotential von 9.6 MW_{th} untersucht. Eine technisch/wirtschaftlich optimierte Wärmerückgewinnung kann dabei theoretisch rund 6.1 MW_{th} einsparen. Dies entspricht einem energetischen Optimierungsgrad von rund 82 % (siehe Anhang C).

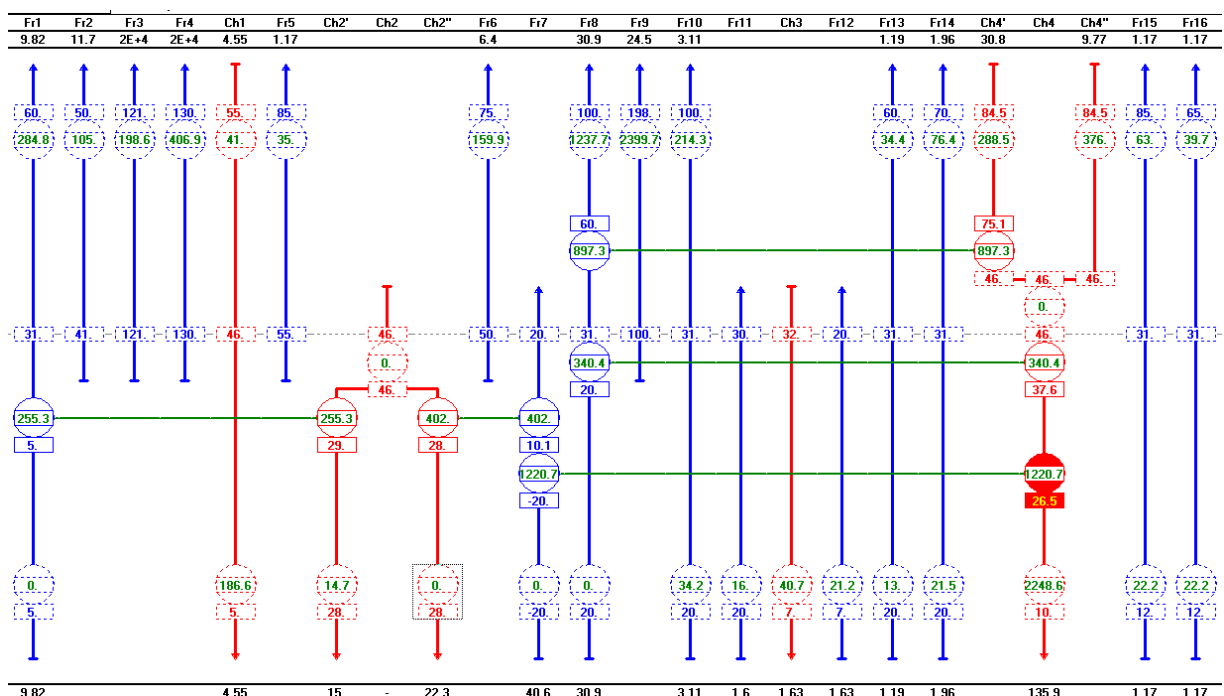
Rund 3.5 MW_{th} Abwärme stehen auf einem Temperaturniveau von etwa 25 °C zur Verfügung, was für die direkte Nutzung in der Anlage zu tief ist (unterer Teil der roten Abwärmekurve in Grafik 4). Der Wärmebedarf, der nicht mit Abwärme gedeckt werden kann (oberer Teil der blauen Kurve), ist auf einem Temperaturniveau von lediglich etwa 60 °C. Es handelt sich dabei praktisch ausschliesslich um die Zulufterwärmungen bei den Sprühtürmen.

Netzwerke

Aus der Gegenüberstellung aller Abwärmegeber und Abwärmenehmer ergibt sich das sogenannte MER-Netzwerk (Maximum Energy Recovery), das die maximale Wärmerückgewinnung mit Wärmetauschern theoretisch umsetzt. Jedem Abwärmegeber oberhalb des Pinchs wird ein Abwärmenehmer zugeordnet, jedem Wärmebezüger unterhalb des Pinchs wird der optimale Wärmelieferant zugewiesen.

Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und der praktischen Umsetzbarkeit der Wärmetauscher entstehen aus dem MER-Netzwerk neue, vereinfachte Netzwerke, aus denen die Massnahmenpakete abgeleitet werden können.

Grafik 5 zeigt einen Ausschnitt aus dem Netzwerk der Variante 2 (Erklärung Variante 2 siehe Kapitel 4.7). Aufzuheizende Ströme sind blau, abzukühlende Ströme sind rot eingezeichnet. Der Energieträger kann dabei Wasser, Luft oder ein anderes Medium sein. Die Verbindung zweier Ströme entspricht einem Wärmetauscher mit entsprechender Leistung (grüne Zahl in Kreis). Ober- und unterhalb des Wärmetauschers ist die Ein-/Austrittstemperatur des Mediums dargestellt (blaues/rotes Viereck).



Grafik 5 Ausschnitt aus dem Netzwerk der Variante 2. Blau: aufzuheizender Strom. Rot: abzukühlender Strom. Verbindung der Ströme: Wärmetauscher mit entsprechender Leistung (grün). Pinch-Temperatur: 38.5 °C. Minimale Temperaturdifferenz: 15 °C.

Diese Studie wurde innerhalb von einem Monat während dem Preengineering durchgeführt und essentielle Kenngrößen für die Pinch-Modellierung wurden laufend erarbeitet, neu definiert oder verändert. Mit der Zeit haben sich „stabile“ Stromkombinationen herausgeschält, die auch nach leicht veränderten Leistungen/Temperaturniveaus noch optimal waren. Das Netzwerk musste daher nicht bei jeder Änderung wieder neu erstellt werden: Eine Konzentration auf die kritischen Stromkombinationen reichte aus. Unwesentliche Änderungen konnten direkt in den Wärmetauscherauslegungen der Massnahmen angepasst werden. Diese Auslegungen sind, für die Basisvariante wie auch die Variante 2, im Anhang B beschrieben.

4.7 Massnahmen

Aus den Netzwerken wurden zwei Massnahmenpakete, genannt Basisvariante und Variante 2, abgeleitet. Sie werden im Folgenden näher erläutert.

- Die **Basisvariante** übernimmt die Anlagenkonstruktion 1:1 vom Anlagenbauer und verknüpft Abwärmegeber mit den geeigneten Abwärmenehmern.
- Die **Variante 2** sieht eine gemeinsame Vorwärmung der Main Air und der SFB Air (Secondary Fluid Bed) zu den Sprühtrocknern vor. Damit kann die Abwärme des Sprühtrockners optimal zur Zuluftvorwärmung genutzt werden.

Variante 2 hat sich im Verlaufe der Studie als bessere Variante durchgesetzt und wird daher auf den folgenden Seiten dargestellt. Die Massnahmentabelle der Basisvariante und die Prinzipschemata der Basisvariante sind im Anhang A zu finden. Die WärmetauscherAuslegung der Basisvariante und der Variante 2 sind im Anhang B abgelegt.

Die Massnahmen sind einzeln realisierbar; die Gruppen wurden definiert, da sie ähnlich sind resp. örtlich im gleichen Bereich liegen.

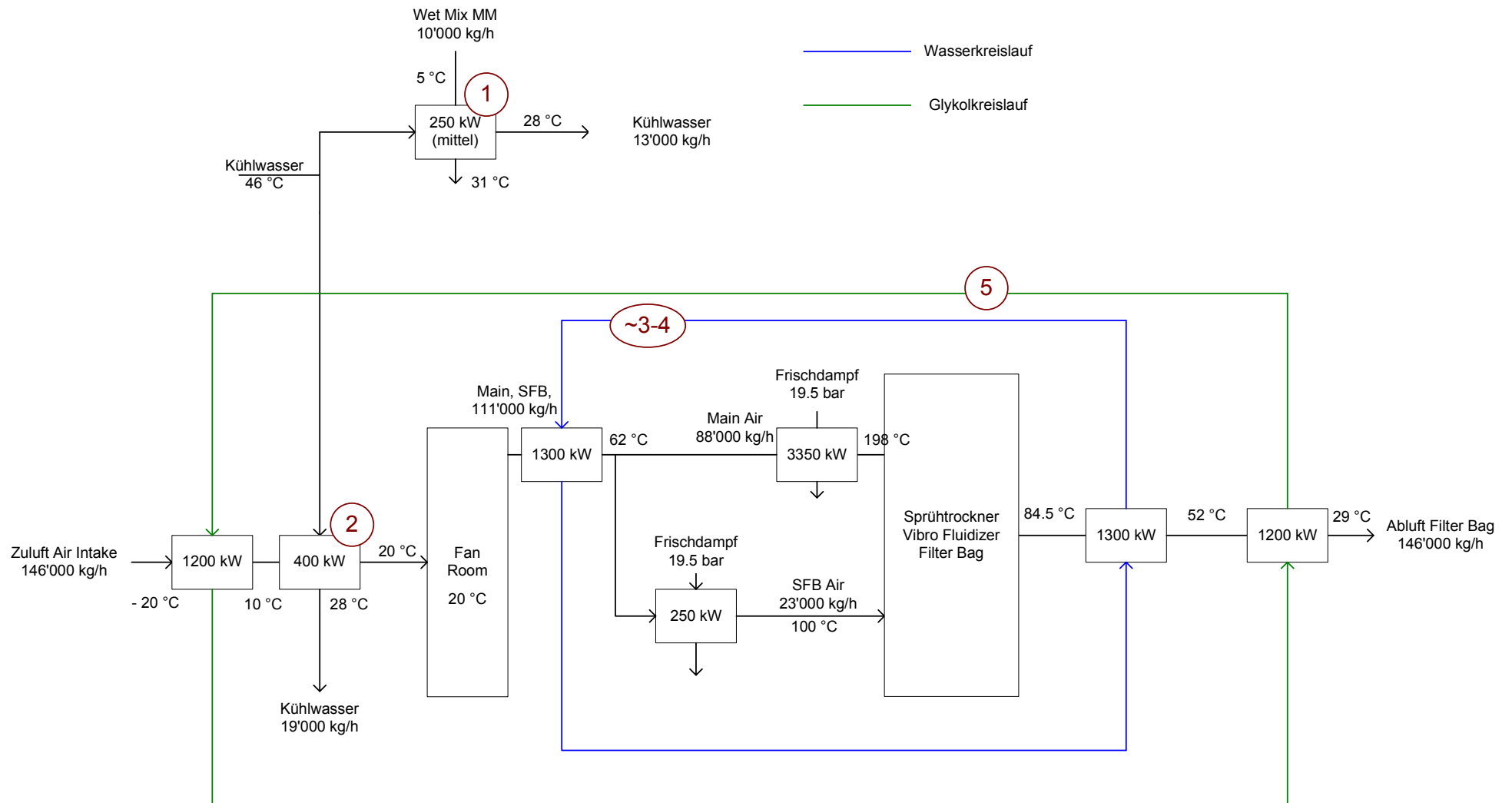
Den Berechnungen der Einsparungen liegt Tabelle 1 zugrunde.

Die Kostenschätzung (exklusiv Mehrwertsteuer) hat eine Genauigkeit von +/- 30%, basierend auf Richtofferten und Erfahrungswerten. Der Payback berücksichtigt einen Kapitalzins von 8 % und die Teuerung der Energie wurde zu 3.0% (Erdgas) angenommen.

Nr.	Massnahme vorgeschlagen / bereits geplant	Investition eff. vorg. [kFr.]	Einsparung (Grobschätzung)				Payback vorg. [a]	Nutzen / Bemerkung
			vorg.	gepl.	vorg.	gepl.		
			[kFr./a]		[MWh/a]			
1	Linie 8 BF: Speicherung von 13'000 kg/h Kühlwasser bei 46 °C in einem Speichertank (ca. 15 m ³) zur Erwärmung der Magermilch im Wet Mix-Behälter von 5 auf 31 °C. (Batch-Prozess, ca. 25 min pro Stunde)	130	60	-	1'000	-	2.5	Neumassnahme, Dampfeinsparung: Nur bei Babyfood (4000 Betriebsstunden), Einsparleistung (0.25MW) ist Durchschnittswert, Speichertank von etwa 15 m3 nötig.
2	Linie 8: Nutzung von 19'000 kg/h Kühlwasser (bei 46 °C) zur Luftvorwärmung Air Intake.	100	36	-	600	-	3.2	Neumassnahme, Dampfeinsparung: 1500 Vollastbetriebsstunden (Winter), Wärmerückgewinnung (0.4MW) bei allen Produkten möglich.
~3-4	Linie 8: Sprühturm. WRG Abluft / Main Air und SFB Air. Kreislaufverbundsystem Wasser.	1'100	414	317	6'900	5'280	3.1	Dampfeinsparung. Wärmetauscher auf anderem Temperaturniveau bereits mit vergleichbarer Leistung geplant. Vorgesehene Leistungen: 1.30 MW bei BF (alt 0.95MW), 0.85 MW bei MM (alt 0.74MW)
5	Linie 8: Wärmetauscher Abluft Sprühtrockner/Air Intake	1'000	108	-	1'800	-	13.5	Neumassnahme, Dampfeinsparung: 1500 Betriebsstunden (Winter), Einsparung von 1.2 MW
6	Linie 5: Aufwärmung des Produktes vor UHT mit Produktkondensat	390	360	360	6'000	6'000	1.3	Bestehende Massnahme, Dampfeinsparung: Einsparung von ca. 1.0 MW gilt sowohl für Molke als auch für Magermilch etwa im gleichen Rahmen
7neu	Linie 5: Sprühturm. WRG Sprühturm Abluft/Main Air und SFB Air	700	198	180	3'300	3'000	3.9	Bestehende Massnahme, Dampfeinsparung: Einsparung von 0.55 MW, Wärmetauscher auf anderem Temperaturniveau bereits mit vergleichbarer Leistung (0.5 MW) geplant.
8	Linie 5: Wärmetauscher Abluft Sprühtrockner/Air Intake. Kreislaufverbundsystem Glykol.	700	54	-	900	-	20.0	Neumassnahme, Dampfeinsparung: Einsparung von 0.6 MW, 1500 Betriebsstunden, bei Molke und Magermilch.
	Total Payback <5a	2'420	1'068	857	17'800	14'280	2.6	
	Total Zusatzeinsparungen Payback <5a	?	211		3'520			
	Total alle Massnahmen	4'120	1'230	857	20'500	14'280	3.7	
	Total Zusatzeinsparungen alle Massnahmen	?	373		6'220			

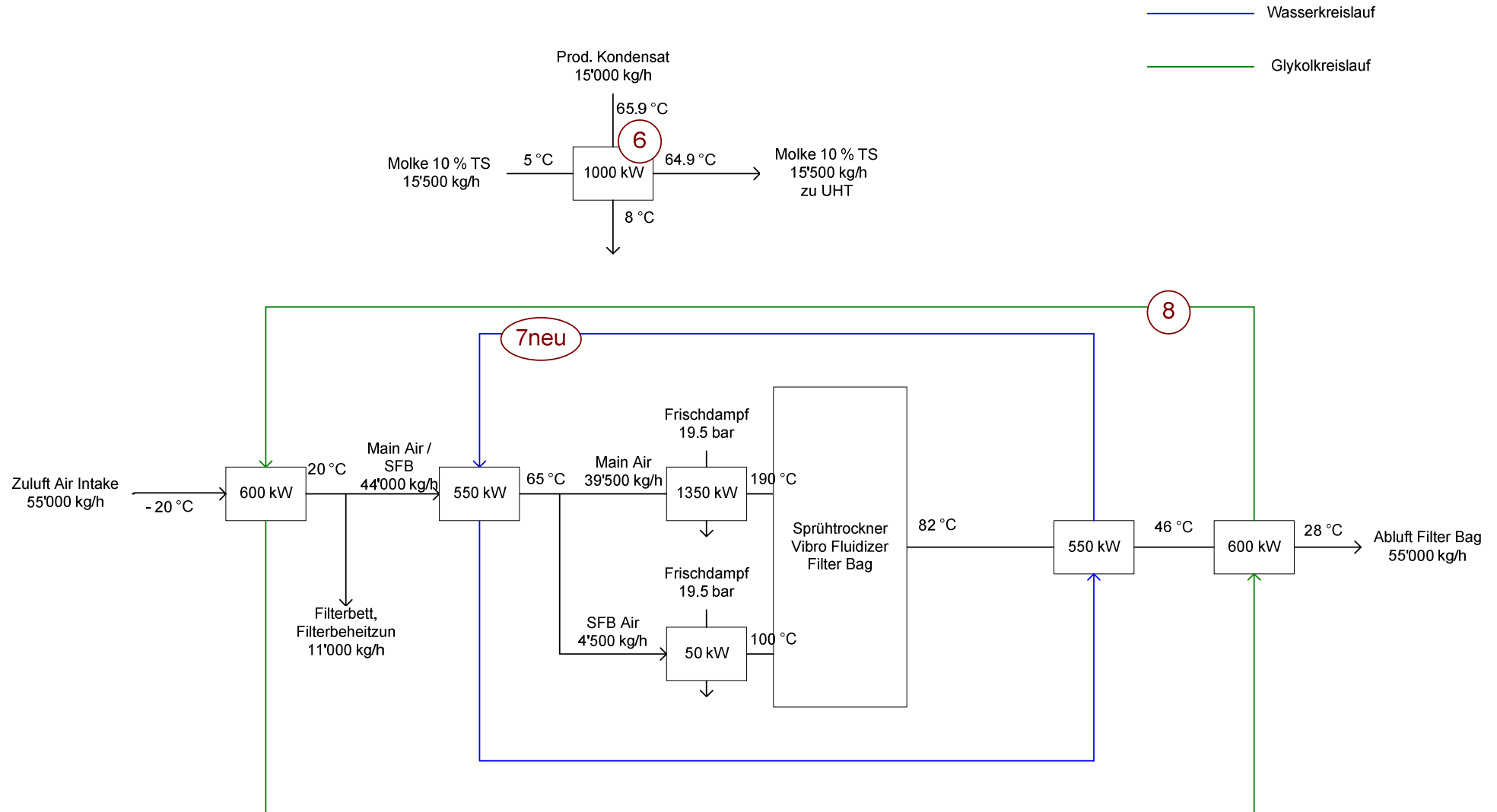
Tabelle 3 *Massnahmentabelle Variante 2*

Linie 8, Variante 2: Sprühtrockner, Wet Mix. Babyfood im Winter, Verarbeitung von 9788 kg/h Magermilch



Grafik 6 Prinzipschema der Massnahmen der Variante 2, Linie 8

Linie 5, Variante 2: Sprühtrockner, Vorwärmung vor UHT. Fall Winter. Verarbeitung von 18'000 kg/h Molke 10 % TS



Grafik 7 *Prinzipschema der Massnahmen der Variante 2, Linie 5*

Bemerkungen zu den Massnahmen

- Die Massnahmen 5 und 8 (Vorwärmung Air Intake mit kondensierender Abluft aus dem Sprühturm) erwiesen sich als unwirtschaftlich. Die niedrige Betriebszeit (nur im Winter) und die Mehrkosten der Wärmetauscher (kondensierende Abluft) sind für den hohen Payback verantwortlich.
- Aus energetischer Sicht bietet sich in Linie 5 als Alternative zur Massnahme 8 eine Kombination von Massnahme 8 und Massnahme 7neu an. Die Abluft des Sprühtrockners der Linie 5 würde somit bis in den kondensierenden Bereich abgekühlt und der gesamte Air Intake könnte vorgewärmt werden. Die Zuluft zu Filterbett 1 und 2 müsste mit geeigneter Frischluftzumischung (im Winter) oder der vorgesehenen Eiswasserkühlung (im Sommer) auf die nötigen 7 °C reguliert werden.
- Linie 8, Babyfood: Etwa 3'900 kg/h Produktkondensat sind wegen des geringen Massenflusses wirtschaftlich nicht optimal über einen geeigneten Abwärmenehmer nutzbar. Es macht energetisch am meisten Sinn, etwa 1'000 der 3'900 kg/h Produktkondensat direkt (d.h. bei 55 °C) als Speisewasser-Nachspeisung zu nutzen.

4.8 Resultate

Die Pinch-Analyse hat während der Preengineering-Phase neue Einsparpotentiale aufgezeigt und einige der bereits geplanten Massnahmen des Kunden als energetisch optimal bestätigt. Es können zusätzlich zu den geplanten Massnahmen Einsparungen von rund 3'640 MWh_{th} respektive knapp 210'000 CHF pro Jahr realisiert werden. Die Wärmerückgewinnung kann absolut gesehen von den geplanten 14.2 GWh_{th} auf 17.8 GWh_{th} erhöht werden. Damit werden bei Investitionskosten von ca. 2.4 Mio CHF über eine Million CHF Energiekosten pro Jahr eingespart. Die Einsparungen wirken sich 1:1 auf den Erdgasverbrauch aus, der um etwa 1.77 Mio m³ pro Jahr verringert wird. Ein CO₂-Ausstoss von rund 3'500 Tonnen pro Jahr kann dadurch vermieden werden.

Von den theoretisch ermittelten 6.1 MW_{th} Einsparung (siehe Kapitel 4.6) können unter Berücksichtigung der technischen Umsetzbarkeit 5.3 MW_{th} erreicht werden. Wird der maximal zulässige Payback pro Massnahme auf 5 Jahre limitiert, ermittelt die Studie eine Einsparung von 3.5 MW_{th} oder 57 % des theoretischen Optimums.

Die Wärmetauscher der Massnahmen 5 und 8, die aufgrund der Wirtschaftlichkeit entfallen sind, hätten im Winter bei Volllast insgesamt 1.8 MW_{th} Leistung eingespart. Über das ganze Jahr gesehen war die Volllastbetriebszeit mit lediglich 1'500 Stunden aber sehr tief. Die eingesparte Primärenergie von insgesamt 2'700 MWh_{th} oder 160'000 CHF pro Jahr verunmöglicht eine wirtschaftliche Umsetzung der Massnahmen (bei Investitionskosten von 1.7 Mio CHF). Aus energetischer Sicht bietet sich in Linie 5 als Alternative zur Massnahme 8 eine Kombination von Massnahme 8 und Massnahme 7neu an. Die Abluft des Sprühtrockners der Linie 5 würde somit bis in den kondensierenden Bereich abgekühlt und der gesamte Air Intake könnte vorgewärmt werden. Die Zuluft zu Filterbett 1 und 2 müsste mit geeigneter Frischluftzumischung (im Winter) oder der vorgesehenen Eiswasserkühlung (im Sommer) auf die nötigen 7 °C reguliert werden.

Die gefundenen Massnahmen mit Payback kleiner 5 Jahren können den ersten zwei Prioritäten, die im Kapitel 4.3 definiert wurden, zugeordnet werden; Die vorgeschlagenen Wärmerückgewinnungen sind innerhalb der zwei Linien und funktionieren bei den Standard-Betriebsfällen optimal. Die Wärmerückgewinnung ist aber auch bei allen weiteren Betriebsfällen gegeben.

Wie bei der Ist-Analyse bereits vermutet liegt das Temperaturniveau der CIP-Anlagen zu hoch, um eine Wärmerückgewinnung mit den bestehenden Abwärmegebern realisieren zu können. Die Pinch-Temperatur der Energieströme der analysierten Prozesse liegt bei 38.5 °C. Jede Wassererwärmung zwischen diesen 38.5 °C und den benötigten 60 °C würde also auf Kosten einer anderen Wärmerückgewinnungsmassnahme geschehen. Da der CIP-Betrieb als Batchbetrieb erfolgt, müssten Tanks installiert werden, um die kontinuierlich anfallende Prozesswärme zu speichern. Es hat sich als wirtschaftlicher herausgestellt, diese Prozessabwärme über einen Wärmebezügler mit kontinuierlichem Bedarf zu nutzen.

Die Kapazität der Dampfversorgung wird trotz der zusätzlich gefundenen Massnahmen überschritten. Um einen Ausbau der Dampfversorgung zu umgehen, muss die Zuluft zum Sprühturm 5 mit einem Gasbrenner auf die geforderten 198 °C erhitzt werden.

4.9 Empfehlungen, weiteres Vorgehen

- Wir empfehlen grundsätzlich die Prüfung der vorgeschlagenen Massnahmen mit Schwerpunkt auf den Massnahmen 1, 2, ~3-4 und 7neu der Variante 2 (Zusammenfassung von Main Air/SFB Air zur verbesserten Luftvorwärmung) und Abgleich mit den durch Niro vorgesehenen Massnahmen bzgl. Machbarkeit und Mehrkosten zur bestehenden Lösung.
- Die Massnahmen 5 und 8 sollen am Rande und vor allem auf die Kosten, im Vergleich zum geplanten Glykolkreislauf, überprüft werden.
- Wir empfehlen zudem eine überschlagsmässige Prüfung der vorgeschlagenen Alternative zu der Massnahme 8 bei Linie 5.
- Die von Niro geplante Massnahme 6 (Linie 5: Produktvorwärmung vor UHT mit Produktkondensat aus Eindampfer und Hochkonzentrator) wurde durch die Pinch-Analyse als optimal bestätigt und wird zur Umsetzung empfohlen.
- Eine definitive Aufnahme in das Gesamtprojekt richtet sich nach den Erfordernissen der geplanten Anlagen Linie 5 und 8, Produktionsflexibilität etc.

5 Schlussfolgerungen

Die Pinch-Analyse konnte während der Preengineering-Phase neue Einsparpotentiale aufzeigen und einige der bereits geplanten Massnahmen des Kunden als energetisch optimal bestätigen. Es wurden zusätzlich zu den geplanten Massnahmen Einsparungen von rund 3'640 MWh_{th} respektive knapp 210'000 CHF pro Jahr gefunden. Die Wärmerückgewinnung kann absolut gesehen von den geplanten 14.2 GWh_{th} auf 17.8 GWh_{th} erhöht werden. Damit werden bei Investitionskosten von ca. 2.4 Mio CHF über eine Million CHF Energiekosten pro Jahr eingespart. Die Einsparungen wirken sich 1:1 aus auf den Erdgasverbrauch aus, der um etwa 1.77 Mio m³ pro Jahr verringert wird. Ein CO₂-Ausstoss von rund 3'500 Tonnen pro Jahr kann dadurch vermieden werden.

Eine Pinch-Analyse als begleitendes Instrument in der Projektierungsphase bietet gegenüber einem Retrofit einer bestehenden Anlage entscheidende Vorteile. Erstens ermöglicht sie von Beginn weg eine energetisch optimierte Produktionsanlage, d.h. effiziente Lösungen können von Anfang an 1:1 umgesetzt werden (keine Umbauten/Anpassungen nötig). Zweitens sind die Mehrkosten der Studie und der vorgeschlagenen Massnahmen im Vergleich zum Gesamtaufwand und zum Gesamteffekt häufig relativ klein. Drittens ist die Datengrundlage im Allgemeinen nach dem Preengineering klar (es ist weniger Aufwand zur Datenerhebung notwendig) und Optimierungsmassnahmen können direkt vor Ort mit dem Anlagenbauer besprochen werden. Der Schlüssel zu einer energetisch optimalen Anlage ist dabei ein effizienter Informationsfluss und eine konstruktive Zusammenarbeit vom Kunden, dem Anlagenbauer und dem Energieingenieur.

Anhang

- A Massnahmentabelle und Prinzipschemata Basisvariante**
- B Auslegung der Wärmetauscher**
- C Definition energetischer Optimierungsgrad**

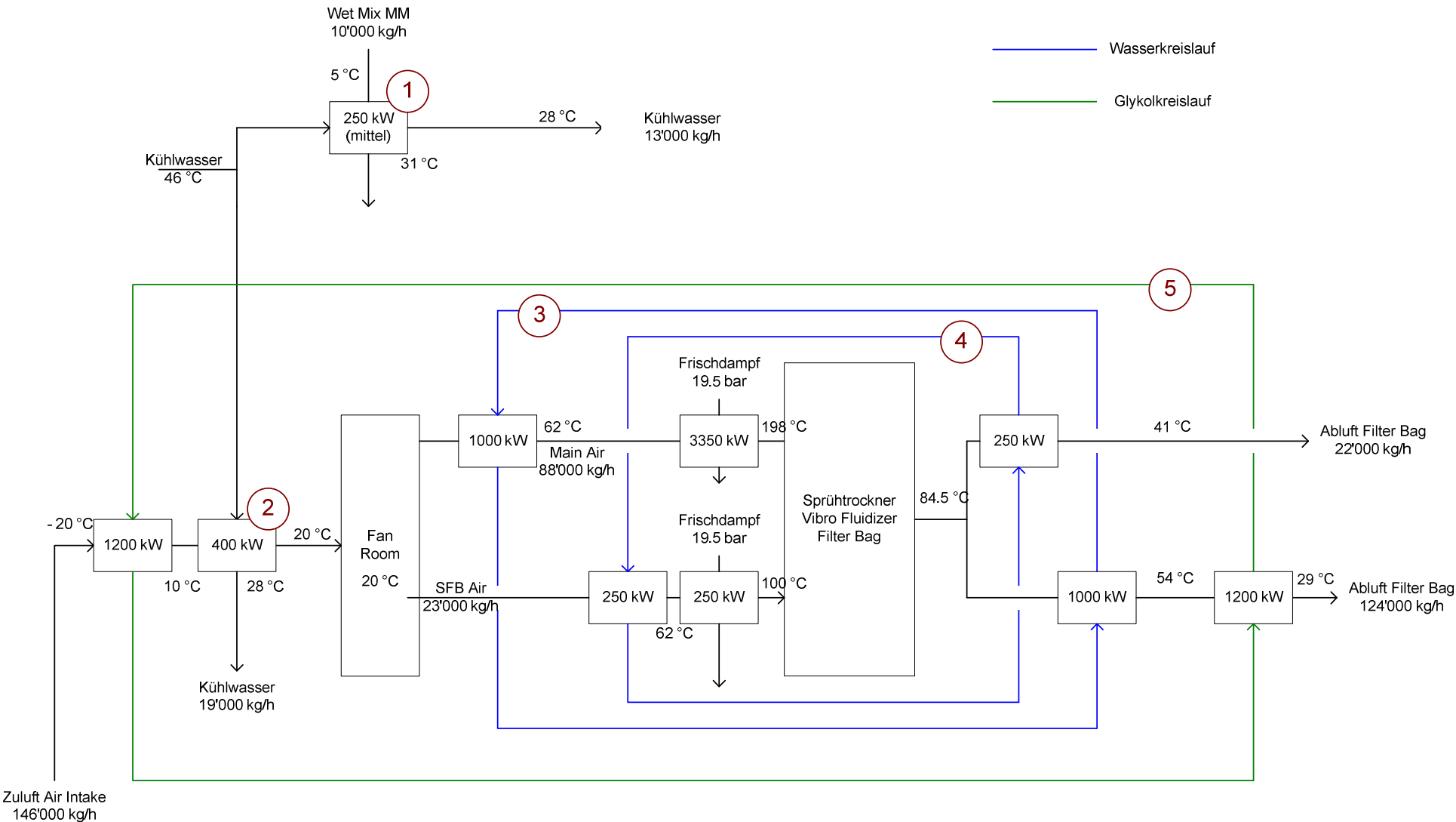
A: Massnahmentabelle Basisvariante

Kostenschätzung : +/- 30% basierend auf Richtofferten und Erfahrungswerten, exkl. MWST

Nr.	Massnahme vorgeschlagen / bereits geplant	Investition eff. vorg. [kFr.]	Einsparung (Grobschätzung)		Payback		Nutzen / Bemerkung	
			vorg. [kFr./a]	gepl. [MW/a]	vorg. [a]	gepl. [a]		
1	Linie 8 BF: Speicherung von 13'000 kg/h Kühlwasser bei 46 °C in einem Speichertank (ca. 15 m³) zur Erwärmung (über WT) der Magermilch im Wet Mix-Behälter von 5 auf 31 °C. (Batch-Prozess, ca. 25 min pro Stunde)	130	60	-	1'000	-	2.5	Neumassnahme, Dampfeinsparung: Nur bei Babyfood (4000 Betriebsstunden), Einsparleistung (0.25MW) ist Durchschnittswert, Speichertank von etwa 15 m3 nötig.
2	Linie 8: Nutzung von 19'000 kg/h Kühlwasser (bei 46 °C) zur Luftvorwärmung Air Intake.	100	36	-	600	-	3.2	Neumassnahme, Dampfeinsparung: 1500 Vollastbetriebsstunden (Winter), Wärmerückgewinnung (0.4MW) bei allen Produkten möglich.
3	Linie 8: Sprühturm. WRG Sprühturm Abluft/Main Air auf anderem Temperaturniveau als vorgesehen (von 20 auf 62 °C anstelle von 10 auf 48 °C). Kreislaufverbundsystem Wasser.	900	318	317	5'300	5'280	3.2	Dampfeinsparung. Wärmetauscher auf anderem Temperaturniveau bereits mit vergleichbarer Leistung geplant. Vorgesehene Leistungen: 1.00 MW bei BF (alt 0.95 MW), 0.65 MW bei MM (alt 0.74 MW)
4	Linie 8: Nutzung eines Teils der Abluft des Sprühtrockners für Vorwärmung SFB Air. Kreislaufverbundsystem Wasser.	400	84	-	1'400	-	5.6	Neumassnahme, Dampfeinsparung: Abluftspaltung nötig. Vorgesehene Leistungen: 0.25 MW bei BF, 0.2 MW bei MM
5	Linie 8: Wärmetauscher Abluft Sprühtrockner/Air Intake. Kreislaufverbundsystem Glykol.	1'000	108	-	1'800	-	13.5	Neumassnahme, Dampfeinsparung: 1500 Betriebsstunden (Winter), Einsparung von 1.2 MW
6	Linie 5: Aufwärmung des Produktes vor UHT mit Produktkondensat	390	360	360	6'000	6'000	1.3	Bestehende Massnahme, Dampfeinsparung: Einsparung von ca. 1.0 MW gilt sowohl für Molke als auch für Magermilch etwa im gleichen Rahmen
7	Linie 5: Sprühturm. WRG Sprühturm Abluft/Main Air max. Vorwärmung. Kreislaufverbundsystem Wasser.	650	180	180	3'000	3'000	4.0	Bestehende Massnahme, Dampfeinsparung: Wärmetauscher auf anderem Temperaturniveau bereits mit vergleichbarer Leistung (0.5 MW) geplant.
8	Linie 5: Wärmetauscher Abluft Sprühtrockner/Air Intake. Kreislaufverbundsystem Glykol.	700	54	-	900	-	20.0	Neumassnahme, Dampfeinsparung: Einsparung von 0.6 MW, 1500 Betriebsstunden, bei Molke und Magermilch.
	Total Payback <5a	2'170	954	857	15'900	14'280	2.6	
	Total Zusatzeinsparungen Payback <5a	?	97		1'620			
	Total alle Massnahmen	4'270	1'200	857	20'000	14'280	4.0	
	Total Zusatzeinsparungen alle Massnahmen	?	343		5'720			

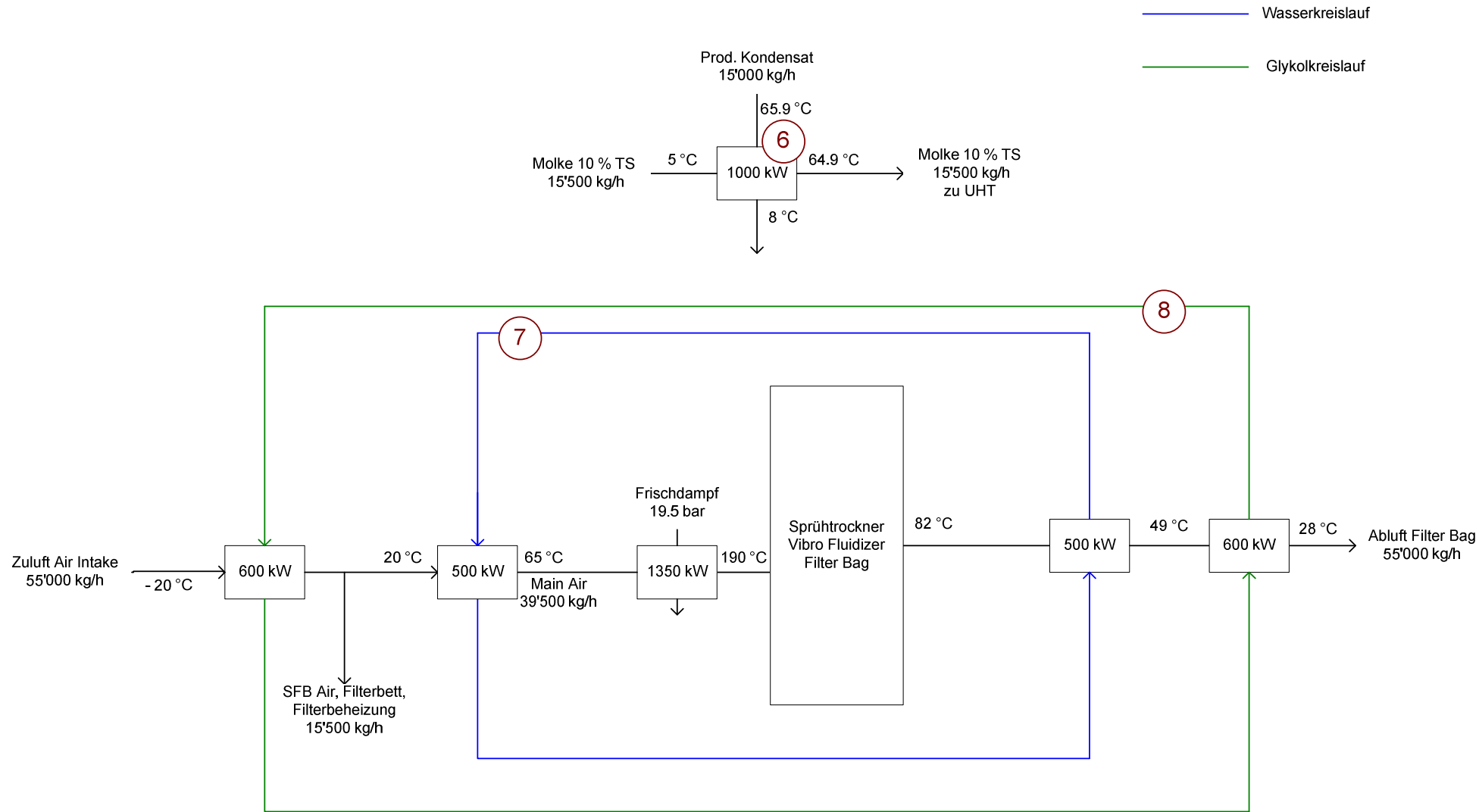
A: Prinzipschema zu Basisvariante (Linie 8)

Linie 8, Basisvariante: Sprühtrockner, Wet Mix. Babyfood im Winter, Verarbeitung von 9788 kg/h Magermilch



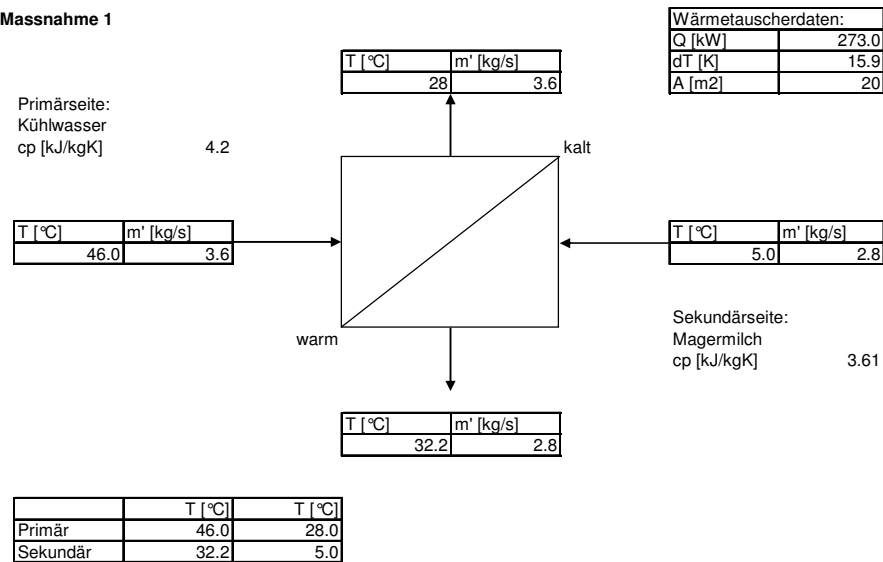
A: Prinzipschema zu Basisvariante (Linie 5)

Linie 5: Sprühtrockner, Vorwärmung vor UHT. Fall Winter. Verarbeitung von 18'000 kg/h Molke 10 % TS

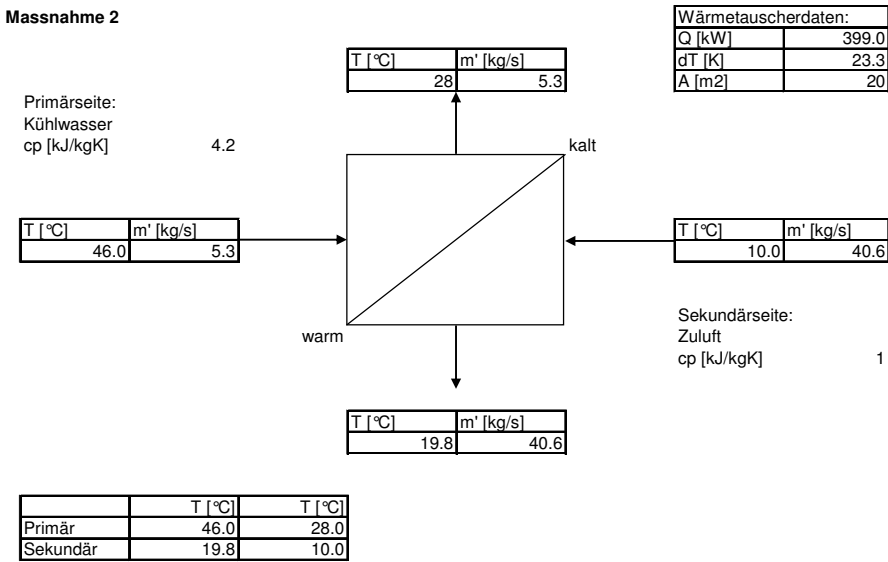


B: Auslegung Wärmetauscher

Linie 8: Massnahme 1



Linie 8: Massnahme 2



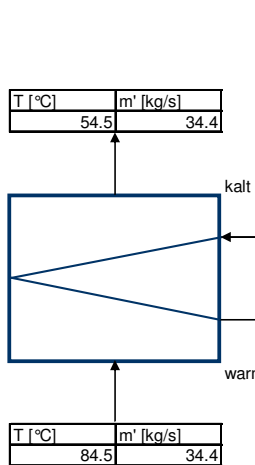
B: Auslegung Wärmetauscher

Linie 8: Basisvariante, Massnahme 3

Variable
Parameter
Berechnet

Wärmetauscher 1:
Abluft feucht
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50

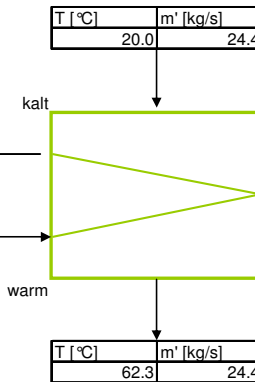


Wärmetauscher 1:	
Q [kW]	1033.3
dT [K]	12.4
A [m2]	1901
C [kFr.]	495

Wärmetauscher 2:	
Q [kW]	1033.3
dT [K]	15.7
A [m2]	1499
C [kFr.]	420

T [°C]	m' [kg/s]
40.8	27181
73.4	27181

Sekundärseite:
Wasser
cp [kJ/kgK] 4.2
alpha sek. 2000



Wärmetauscher 2:
Zuluft
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50

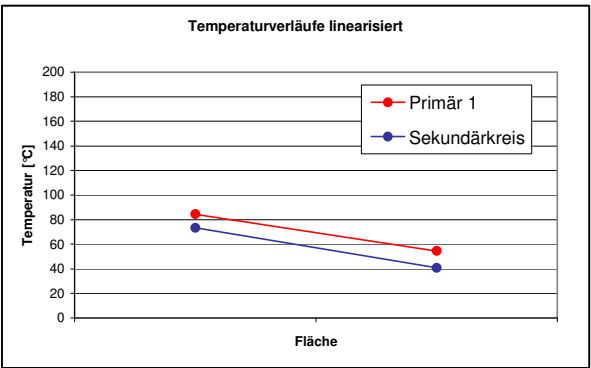
Verhältnis Volumenstrom 1.41
Verhältnis + 10% 1.55
Verhältnis - 10% 1.27
Verhältnis Flächen WT 1/2 1.27

	T [°C]	T [°C]
Primär 1	84.5	54.5
Sekundärkreis	73.4	40.8

	T [°C]	T [°C]
Sekundärkreis	73.4	40.8
Primär 2	62.3	20.0

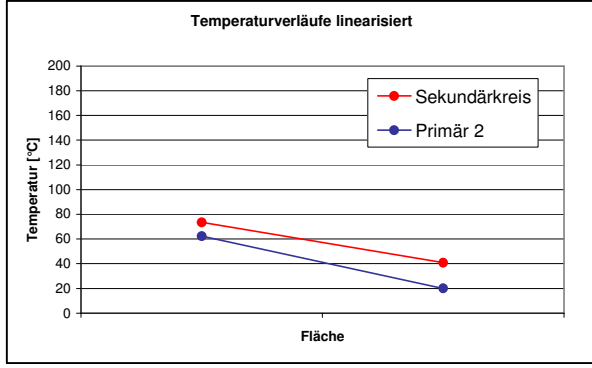
k [kW/m2K] 0.0439
0.0009
dT warm [K] 11.1
dT kalt [K] 13.7

dT mittel [K] 12.4
dT LMTD [K] 12.4
dT [K] 12.4
soll zwischen dTm und LMTD sein
nahe LTMD 12.4



k [kW/m2K] 0.04
0.0009
dT warm [K] 11.1
dT kalt [K] 20.8

dT mittel [K] 16.0
dT LMTD [K] 15.5
dT [K] 15.7
soll zwischen dTm und LMTD sein,
nahe LTMD 15.7



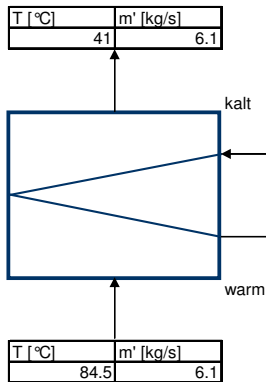
B: Auslegung Wärmetauscher

Linie 8: Basisvariante, Massnahme 4

Variable
Parameter
Berechnet

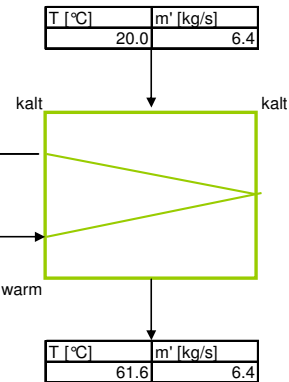
Wärmetauscher 1:
Abluft feucht
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50



Wärmetauscher 1:	
Q [kW]	265.8
dT [K]	11.0
A [m2]	552
C [kFr.]	212

Wärmetauscher 2:	
Q [kW]	265.8
dT [K]	11.0
A [m2]	552
C [kFr.]	212



Wärmetauscher 2:
Zuluft
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50

T [°C]	m' [kg/s]
30.5	5'354
73.1	5'354

Sekundärseite:
Wasser
cp [kJ/kgK]
alpha sek.

4.2
2000

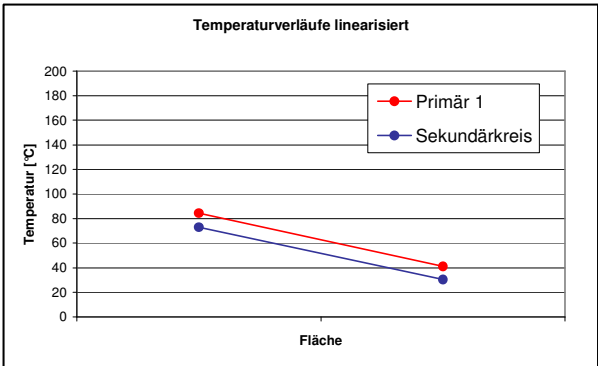
Verhältnis Volumenstrom 0.96
Verhältnis + 10% 1.05
Verhältnis - 10% 0.86
Verhältnis Flächen WT 1/2 1.00

	T [°C]	T [°C]
Primär 1	84.5	41.0
Sekundärkreis	73.1	30.5

	T [°C]	T [°C]
Sekundärkreis	73.1	30.5
Primär 2	61.6	20.0

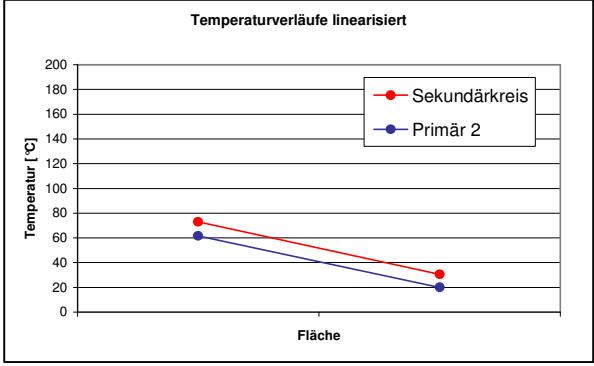
k [kW/m2K] 0.0439
0.0009
dT warm [K] 11.4
dT kalt [K] 10.5

dT mittel [K] 11.0
dT LMTD [K] 11.0
dT [K] 11.0
soll zwischen dTm und LMTD sein
nahe LTMD
11.0



k [kW/m2K] 0.04
0.0009
dT warm [K] 11.4
dT kalt [K] 10.5

dT mittel [K] 11.0
dT LMTD [K] 11.0
dT [K] 11.0
soll zwischen dTm und LMTD sein,
nahe LTMD
11.0

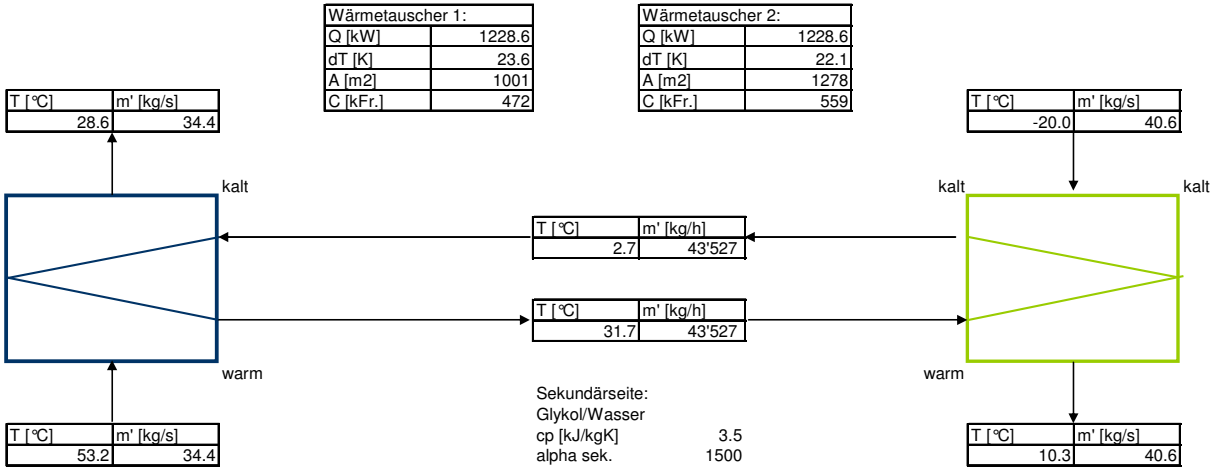


B: Auslegung Wärmetauscher

Linie 8: Basisvariante, Massnahme 5

Variable
Parameter
Berechnet

Wärmetauscher 1:
Abluft feucht
cp [kJ/kgK]
alpha primär
1.45
60



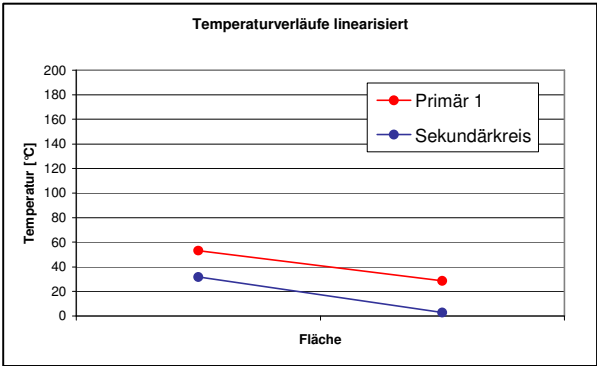
Verhältnis Volumenstrom 0.85
Verhältnis + 10% 0.93
Verhältnis - 10% 0.76
Verhältnis Flächen WT 1/2 0.78

	T [°C]	T [°C]
Primär 1	53.2	28.6
Sekundärkreis	31.7	2.7

	T [°C]	T [°C]
Sekundärkreis	31.7	2.7
Primär 2	10.3	-20.0

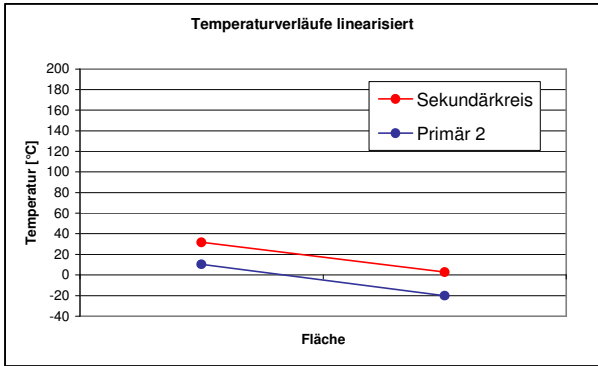
k [kW/m2K] 0.0519
0.0009
dT warm [K] 21.5
dT kalt [K] 25.9

dT mittel [K] 23.7
dT LMTD [K] 23.6
dT [K] 23.6
soll zwischen dTm und LMTD sein
nahe LTMD
23.6



k [kW/m2K] 0.04
0.0009
dT warm [K] 21.5
dT kalt [K] 22.7

dT mittel [K] 22.1
dT LMTD [K] 22.1
dT [K] 22.1
soll zwischen dTm und LMTD sein,
nahe LTMD
22.1



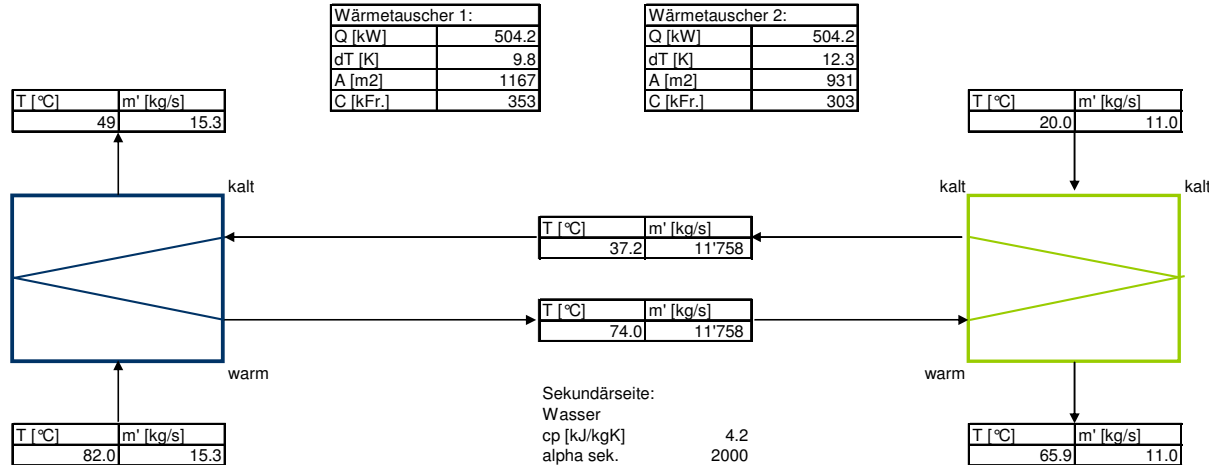
B: Auslegung Wärmetauscher

Linie 8: Basisvariante, Massnahme 7

Variable
Parameter
Berechnet

Wärmetauscher 1:
Abluft feucht
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50



Wärmetauscher 2:
Zuluft
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50

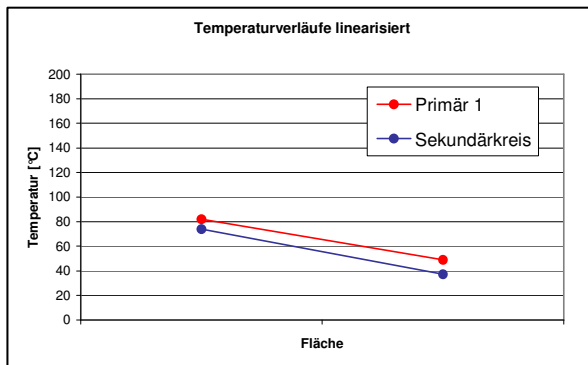
Verhältnis Volumenstrom 1.39
Verhältnis + 10% 1.53
Verhältnis - 10% 1.25
Verhältnis Flächen WT 1/2 1.25

	T [°C]	T [°C]
Primär 1	82.0	49.0
Sekundärkreis	74.0	37.2

	T [°C]	T [°C]
Sekundärkreis	74.0	37.2
Primär 2	65.9	20.0

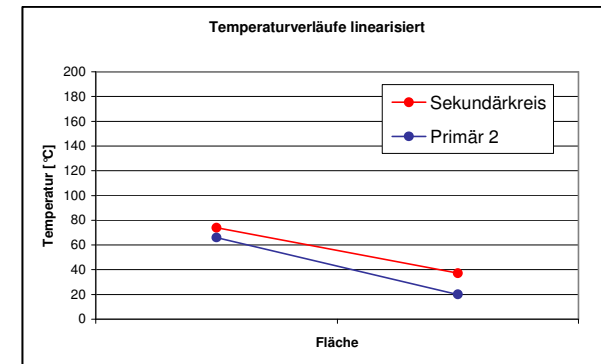
k [kW/m²K] 0.0439
0.0009
dT warm [K] 8.0
dT kalt [K] 11.8

dT mittel [K] 9.9
dT LMTD [K] 9.8
dT [K] 9.8
soll zwischen dTm und LMTD sein
nahe LTMD
9.8



k [kW/m²K] 0.04
0.0009
dT warm [K] 8.0
dT kalt [K] 17.2

dT mittel [K] 12.6
dT LMTD [K] 12.0
dT [K] 12.3
soll zwischen dTm und LMTD sein,
nahe LTMD
12.3



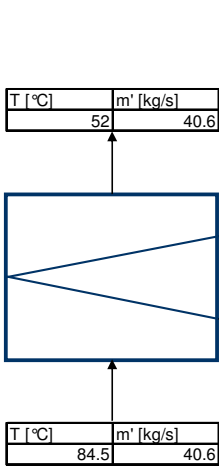
B: Auslegung Wärmetauscher

Linie 8, Variante 2: Abluft-WRG Massnahme 3-4

Variable
Parameter
Berechnet

Wärmetauscher 1:
Abluft feucht
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50

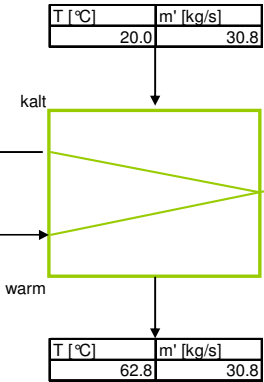


Wärmetauscher 1:	
Q [kW]	1318.4
dT [K]	12.2
A [m2]	2458
C [kFr.]	593

Wärmetauscher 2:	
Q [kW]	1318.4
dT [K]	14.5
A [m2]	2076
C [kFr.]	527

T [°C]	m' [kg/s]
38.4	32066.1
73.6	32'066

Sekundärseite:
Wasser
cp [kJ/kgK] 4.2
alpha sek. 2000



Wärmetauscher 2:
Zuluft
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50

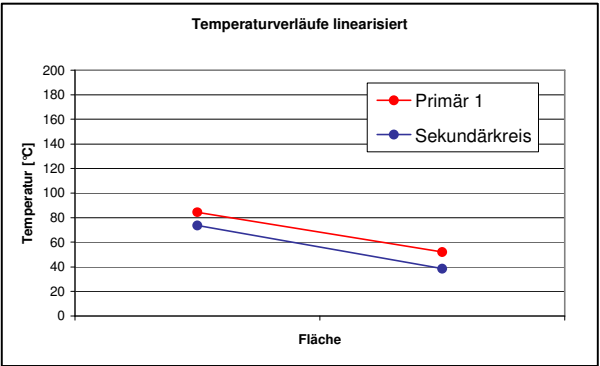
Verhältnis Volumenstrom 1.32
Verhältnis + 10% 1.45
Verhältnis - 10% 1.18
Verhältnis Flächen WT 1/2 1.18

	T [°C]	T [°C]
Primär 1	84.5	52.0
Sekundärkreis	73.6	38.4

	T [°C]	T [°C]
Sekundärkreis	73.6	38.4
Primär 2	62.8	20.0

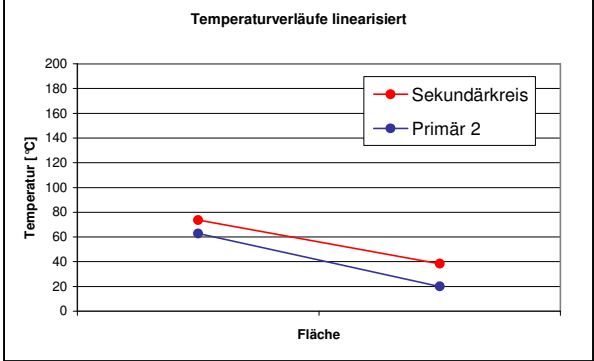
k [kW/m2K] 0.0439
0.0009
dT warm [K] 10.9
dT kalt [K] 13.6

dT mittel [K] 12.2
dT LMTD [K] 12.2
dT [K] 12.2
soll zwischen dTm und LMTD sein
nahe LTMD
12.2



k [kW/m2K] 0.04
0.0009
dT warm [K] 10.9
dT kalt [K] 18.4

dT mittel [K] 14.6
dT LMTD [K] 14.3
dT [K] 14.5
soll zwischen dTm und LMTD sein,
nahe LTMD
14.5



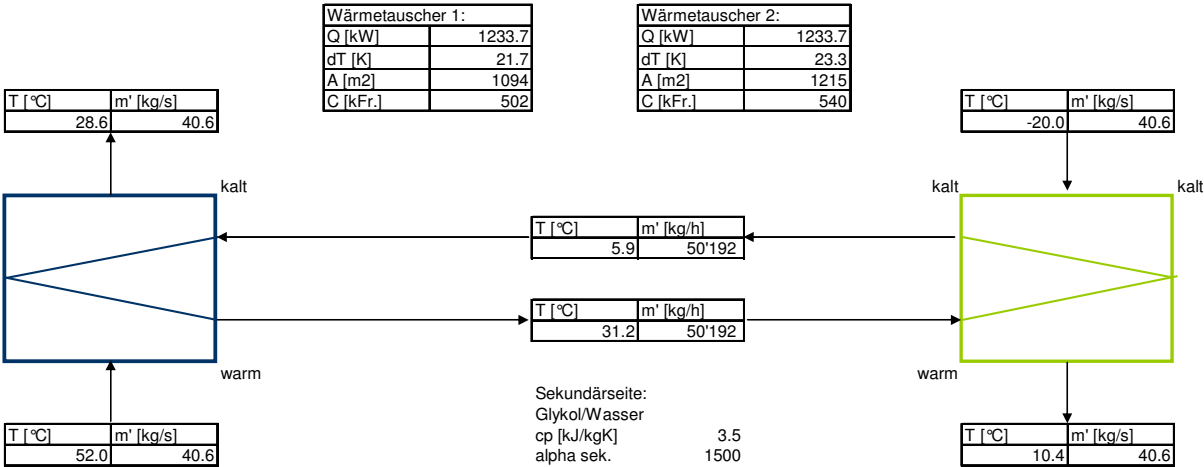
B: Auslegung Wärmetauscher

Linie 8, Variante 2: Massnahme 5

Variable
Parameter
Berechnet

Wärmetauscher 1:
Abluft feucht
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1.3
60



Wärmetauscher 2:
Zuluft
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50

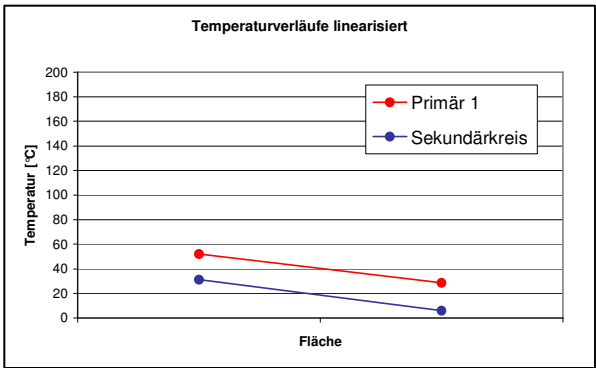
Verhältnis Volumenstrom 1.00
Verhältnis + 10% 1.10
Verhältnis - 10% 0.90
Verhältnis Flächen WT 1/2 0.90

	T [°C]	T [°C]
Primär 1	52.0	28.6
Sekundärkreis	31.2	5.9

	T [°C]	T [°C]
Sekundärkreis	31.2	5.9
Primär 2	10.4	-20.0

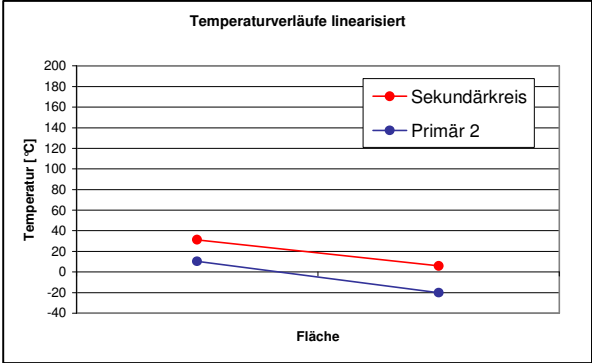
k [kW/m2K] 0.0519
0.0009
dT warm [K] 20.8
dT kalt [K] 22.7

dT mittel [K] 21.7
dT LMTD [K] 21.7
dT [K] 21.7
soll zwischen dTm und LMTD sein
nahe LTMD
21.7



k [kW/m2K] 0.04
0.0009
dT warm [K] 20.8
dT kalt [K] 25.9

dT mittel [K] 23.4
dT LMTD [K] 23.3
dT [K] 23.3
soll zwischen dTm und LMTD sein,
nahe LTMD
23.3



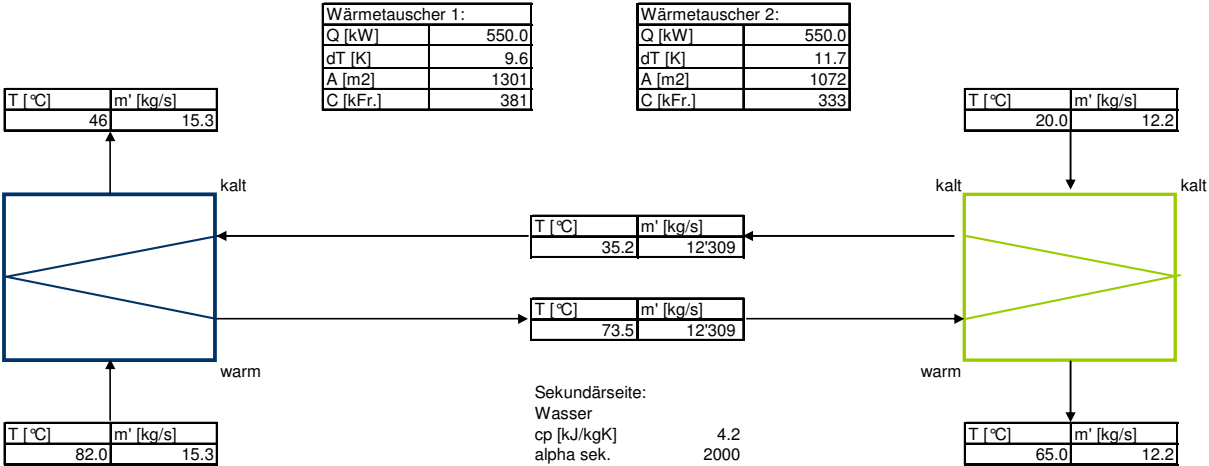
B: Auslegung Wärmetauscher

Linie 8, Variante 2: Massnahme 7

Variable
Parameter
Berechnet

Wärmetauscher 1:
Abluft feucht
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50



Wärmetauscher 2:
Zuluft
cp [kJ/kgK]
alpha primär

1
50

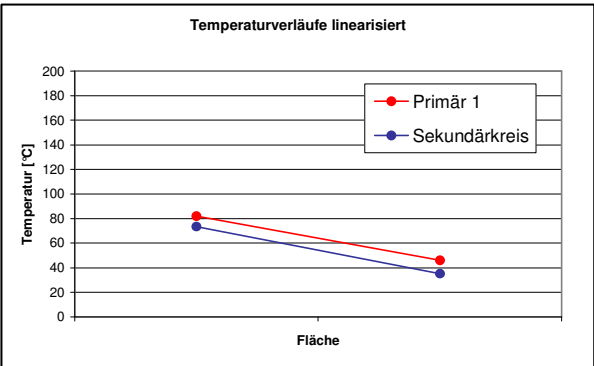
Verhältnis Volumenstrom 1.25
Verhältnis + 10% 1.38
Verhältnis - 10% 1.13
Verhältnis Flächen WT 1/2 1.21

	T [°C]	T [°C]
Primär 1	82.0	46.0
Sekundärkreis	73.5	35.2

	T [°C]	T [°C]
Sekundärkreis	73.5	35.2
Primär 2	65.0	20.0

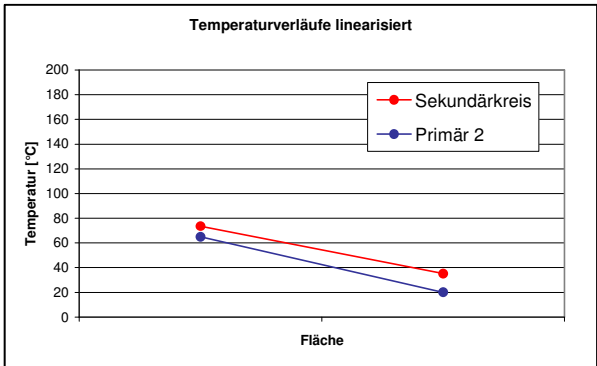
k [kW/m2K] 0.0439
0.0009
dT warm [K] 8.5
dT kalt [K] 10.8

dT mittel [K] 9.6
dT LMTD [K] 9.6
dT [K] 9.6
soll zwischen dTm und LMTD sein
nahe LTMD
9.6



k [kW/m2K] 0.04
0.0009
dT warm [K] 8.5
dT kalt [K] 15.2

dT mittel [K] 11.9
dT LMTD [K] 11.5
dT [K] 11.7
soll zwischen dTm und LMTD sein,
nahe LTMD
11.7



C: Definition energetischer Optimierungsgrad

Der energetische Optimierungsgrad η ist eine energetische Standortbestimmung verglichen mit dem technisch-wirtschaftlichen Optimum (absolute energetische Güte vs. Zeitreihen und Branchenkenzahlen).

$$\eta = \frac{Q_{\max} - Q_{\text{ist}}}{Q_{\max} - Q_{\min}}$$

$Q_{\max}$: Thermische Leistung ohne Optimierung (kW)

Q_{ist} : Heutige thermische Leistung (kW)

$Q_{\min}$: Minimale thermodynamische Leistung (kW) mit $\Delta T_{\min} = 0$

Q_{opt} : Thermische Leistung, technisch-wirtschaftlich optimiert mit der Pinch-Methode (kW)

