

Schlussbericht April 2003

# Zentrale Wärmepumpenanlage Schlossmatt

## Ist-Zustandsanalyse und Massnahmen

ausgearbeitet durch  
Dieter Többen und Martin Stöckli  
Dr.EICHER+PAULI AG  
Zinggstrasse 1, 3007 Bern

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>1. Ausgangslage und Geschichte</b>	<b>4</b>
<b>2. Problemstellungen</b>	<b>5</b>
<b>3. Analyse und Massnahmen</b>	<b>6</b>
3.1. Anschluss Überbauung Bärenmatte	6
3.2. Wärmepumpe	8
3.3. Redundanzen	18
<b>4. Entscheidungsweg</b>	<b>19</b>

## © Copyright

Dr.EICHER+PAULI AG, CH-3007 Bern  
Vervielfältigung auszugsweise oder des gesamten Inhaltes  
nur unter Quellenangabe erlaubt.

## Impressum

Projektnummer: 02.3046.1  
Verfasser: Martin Stöckli  
Telefon: 031 333 99 18  
E-Mail: martin.stoeckli@eicher-pauli.ch

Freigabe: 15. April 2003

Mitautoren: Dieter Többen

## Dokumentation

Stand: 3. Fassung vom 20. November 2003

## Zusammenfassung

Im Gebiet Schlossmatte konnte 1992 ein Wärmeverbund mit einer Wärmepumpe von 750 kW Heizleistung realisiert werden. Als Wärmequelle dient das gereinigte Abwasser der ARA Münsingen, das über eine Leitung von 2'200 m gefördert wird. Der weitere Ausbau des Wärmeverbundes erlaubte im Jahr 1997 eine zweite Wärmepumpe von 1'650 kW Heizleistung einzubauen. Die Spitzendeckung erfolgt durch einen Ölheizkessel von 1'450 kW Leistung.

Der bisherige Betrieb der Anlage verlief trotz einigen Mängeln grundsätzlich positiv. Der Versorgungsanteil der Wärmepumpen ist mit über 85% hoch. Ausgelöst durch einen möglichen Neuanschluss liessen die Betreiber mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie eine Ist-Zustandanalyse mit Massnahmen erstellen.

Die Ist-Zustandanalyse zeigt folgende wesentlichen Mängel auf:

- Die beiden bestehenden Wärmepumpen können zur Zeit nicht parallel betrieben werden. Die Gründe liegen in der ungenügenden Wärmequelle und in hydraulischen Problemen.
- Die Arbeitszahl der Wärmepumpe (ohne Förderpumpe) ist mit 3.2 recht gut. Wird der Pumpenstrom zur Förderung des gereinigten Abwassers einbezogen, fällt die Arbeitszahl auf 2.6, was eindeutig zu tief ist. Die Hauptursache liegt bei einer zu knapp dimensionierten Förderleitung und hydraulischen Mängeln.

Für den weiteren Betrieb wurden verschiedene Massnahmen und Empfehlungen erarbeitet:

- Der Wärmepumpen-Betrieb muss optimiert werden. Es ist unbedingt anzustreben, dass Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen quellen- und witterungstemperaturabhängig geschoben werden können. Zudem lassen variable Volumenströme auf der Verdampferseite eine markante Senkung des Stromverbrauchs auf der Transportleitung zwischen ARA und Wärmepumpen zu.
- Vor Änderungen an der Übergabestation und Massnahmen zur Verstärkung der Wärmequelle sollte der geplante Ausbau der ARA abgewartet werden. Als neue Haupt-Wärmequelle würde sich Grundwasser anbieten, das allerdings nur zwischen Aare und Giesse in genügender Ergiebigkeit für die Gesamt-Anlage zur Verfügung steht. Weitere mögliche Wärmequellen sind die Überschusswärme vom BHKW der ARA und Abwärme aus der projektierten Kompostieranlage auf dem Gelände der ARA.

Der Anschluss der Bärenmatte an den Wärmeverbund kann und muss unbedingt realisiert werden, da die Anschlussgebühren bedeutend höher sind, als die notwendigen Investitionen und die Kapazität der Fernleitung ausreicht.

**Wärmeverbund besteht seit 1992. Als Wärmequelle dient gereinigtes Abwasser.**

**Betrieb verlief bisher grundsätzlich positiv.**

**Analyse hat Mängel im Betrieb und der Effizienz der WP-Anlage aufgezeigt.**

**Es werden Optimierungsmassnahmen und mit den geplanten Sanierungen der ARA Anpassungen der Übergabestation empfohlen.**

**Der Anschluss von neuen Bezüglern ist anzustreben.**

## Résumé

Le chauffage du quartier Schlossmatte à Münsingen (BE) fut réalisé en 1992 avec une pompe à chaleur de 750 kW. La chaleur provient des eaux épurées de la STEP de Münsingen distante de 2200 mètres. L'extension du réseau permit en 1997 l'implantation d'une deuxième pompe à chaleur de 1'650 kW. Une chaudière à mazout de 1'450 kW couvre les pointes de puissance.

L'exploitation s'est dans l'ensemble bien déroulée depuis malgré quelques petits défauts. La part de l'énergie de chauffage couverte par la PAC représente 85% des besoins ce qui est exceptionnellement élevé pour ce type d'installation. La perspective d'opérer de nouveaux raccordements a incité l'exploitant à effectuer une analyse de la situation, rendue possible grâce au soutien de l'OFEN.

L'analyse révéla les lacunes suivantes: :

- Le coefficient de performance des PAC sans pompes de circulation atteint la valeur honorable de 3.2. Il chute à 2.6 si on en tient compte, ce qui est bien trop faible. Cela est dû à des problèmes hydrauliques.

Pour la suite de l'exploitation, le rapport propose les mesures suivantes:

- Le fonctionnement des PAC doit être optimisé. Les températures d'évaporation et de condensation doivent pouvoir être ajustées en fonction des températures de la source et de la distribution. L'introduction de débit variable côté source permettrait de réduire fortement la consommation d'électricité pour le pompage entre la STEP et les PAC.
- Avant tout, il serait judicieux d'attendre les travaux d'extension prévus dans la STEP. Ensuite on pourrait entreprendre l'amélioration des sous-stations et l'augmentation de la puissance de la source de chaleur, notamment par l'utilisation de la nappe phréatique, présente en quantité suffisante pour tout le site. D'autres producteurs de chaleur sont envisageables: la CCF de la STEP ou l'installation de compostage située sur le site de la STEP.

Financièrement, il est impératif de raccorder la zone Bärenmatte au réseau car les taxes de raccordement couvriraient largement les investissements, d'autant plus que la capacité de la conduite est suffisante.



## 2. Problemstellungen

Die Energie- und Wasserversorgung Münsingen als Betreiberin sieht sich heute mit teils mehrschichtigen Frage- und Problemstellungen konfrontiert:

- Kann und soll die geplante Überbauung Bärenmatte an den Wärmeverbund angeschlossen werden?
- Die beiden Wärmepumpen können nicht parallel betrieben werden. Was ist zu tun, um diese Einschränkung zu beheben? Wie kann die Stabilität der Wärmequelle erhöht werden?

In der Folge wurde Dr. Eicher + Pauli AG im Herbst 2002 beauftragt, die Problemstellungen zu analysieren, Massnahmen vorzuschlagen und mit einer Umsetzungsstrategie darzustellen.

## 3. Analyse und Massnahmen

### 3.1. Anschluss Überbauung Bärenmatte

Die Bruttogeschossfläche der Überbauung beträgt ca. 10'000 m<sup>2</sup> und umfasst 65 - 70 Wohneinheiten.

In Gesprächen zwischen Bauverwaltung und Bauherrschaft wurde vereinbart, dass bei einem Anschluss an den Wärmeverbund nur Raumwärme bezogen wird. Das Warmwasser wird mit einem anderen Energieträger erzeugt. Der Wärmeleistungsbedarf beträgt ca. 300 kW.

Die Überbauung Bärenmatte wird im Fernleitungsast 'SBB' zweitletzter Bezüger vor der Schulanlage Rebacker. Die erforderlichen Anschlussstutzen mit DN 125 sind bereits vorhanden.

#### 3.1.1. Grundlagen

Die den Archiv-Unterlagen entnommenen Systemtemperaturen sind nicht einheitlich. Gemäss 'technischen Anschlussbedingungen Schlossmatt' variieren diese zwischen Alt- und Neubauten. Den Berechnungen wurde darum als vorsichtige Annahme eine Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf von 15 K zugrunde gelegt.

Bei mehreren Bezügerstutzen stimmen abonnierte und gemessene Leistung nicht überein. Für die Berechnungen wurde jeweils der höhere Wert eingesetzt.

#### 3.1.2. Technische Daten

- Wärmeleistung bisher	ca. 1'600 kW
- Volumenstrom bisher	ca. 90 m <sup>3</sup> /h
- Druckverlust bisher	ca. 170 kPa

Der errechnete Druckverlust stimmt gut mit der Einstellung an den differenzdruckgeregelten Pumpen der Fernleitung überein.

- Wärmeleistung mit Bärenmatte	ca. 1'900 kW
- Volumenstrom neu	ca. 107 m <sup>3</sup> /h
- Druckverlust neu	ca. 200 kPa

Der Anschluss Bärenmatte hat somit einen zusätzlichen Druckverlust von ca. 30 kPa zur Folge. Die vorhandenen Pumpen können diese Druckerhöhung problemlos erbringen. Die Fließgeschwindigkeit in der Fernleitung steigt auch bei der Leistungssteigerung von 300 kW in keiner Teilstrecke über 0.8 m/s. An der Fernleitung selber sind also keine Massnahmen notwendig.

Der zulässige Druckverlust über die Unterstation von/bis Stutzen an der Fernleitung darf 100 kPa nicht überschreiten; anzustreben sind 30 - 40 kPa.

Ebenfalls anzustreben sind tiefere Systemtemperaturen als dies die technischen Anschlussbedingungen vorgeben. Diese können erreicht werden, wenn die Wärmeverteilung der Bärenmatte mit Systemtemperaturen  $\leq 40/30^{\circ}\text{C}$  (Flächenheizung) und der Plattenwärmetauscher der Unterstation auf eine Temperaturdifferenz im zwischen Primär- und Sekundär-Rücklauf  $\leq 3\text{K}$  ausgelegt wird. Diese Massnahmen steigern die Kapazität der Fernleitung für weitere Anschlüsse.

### **3.1.3. Hydraulischer Abgleich**

Mit dem neuen Anschluss müssen alle Bezüger der Fernleitung 'SBB' hydraulisch abgeglichen werden. Der Abgleich besteht aus der Einstellung der primärseitigen Strangregulierorgane auf die Soll-Wassermenge, bzw. einen Gesamt-Druckverlust von ca. 200 kPa.

### **3.1.4. Schulanlage Rebacker**

Die Schulanlage Rebacker als letzter Bezüger am betrachteten Strang weist mit ca. 100 kPa den grössten Teilstrecken-Druckverlust auf (50 % vom Gesamt-Druckverlust). Bedingt durch die Lage bleiben für diesen Bezüger auch mit dem Anschluss der Bärenmatte die Verhältnisse unverändert.

Bei zukünftigen Arbeiten (z.B. altersbedingter Ersatz oder Reparaturen) an der Unterstation sollte darauf geachtet werden, dass der Druckverlust auf der Fernleitungsseite gesenkt werden kann.

### **3.1.5. Schlussfolgerung**

Der Anschluss der Bärenmatte an den Wärmeverbund kann technisch ohne Einschränkungen realisiert werden.

Aus wirtschaftlicher Sicht muss der Anschluss unbedingt angestrebt werden, da die einmalige Anschlussgebühr von ca. Fr. 150'000.-- und die jährlichen Abgeltungen von ca. Fr. 65'000.-- gewichtige Beiträge an Amortisation, Betrieb und Unterhalt der ZWPA darstellen. Im Vergleich dazu kostet der Anschluss der Bärenmatte die EWV nur Fr. 15'000.-- bis Fr. 30'000.--.

## 3.2. Wärmepumpe

Durch die Betreiberin wurde festgestellt, dass

- die Menge des gereinigten Abwassers nachts auf Werte absinkt, die sogar für den Betrieb der kleineren Wärmepumpe (bei 100% Leistung) nicht mehr genügen.
- die Temperatur des gereinigten Abwassers bei Schneeschmelze und/oder Regen bei entsprechenden Aussentemperaturen unter 7°C sinkt. Bei einer Temperaturdifferenz über den Plattenwärmetauscher von 3 K liegt die Vorlauftemperatur im Kaltwassernetz unter 4°C. Der Frostwächter schaltet als Folge die Wärmepumpen ab.
- die kleine Wärmepumpe verdampferseitig zu wenig Wasser erhält, wenn gleichzeitig die grosse Wärmepumpe in Betrieb ist. Der Strömungswächter schaltet die kleine Wärmepumpe ab.

### 3.2.1. Gereinigtes Abwasser

In der Vergangenheit wurden ungewollte Grundwasser-Eintritte in die Kanalisation eliminiert. Diese Massnahmen haben zu einem markanten Rückgang der für die Wärmepumpe zur Verfügung stehenden Wassermenge geführt.

Die vom Tagesgang abhängige Menge gereinigten Abwassers sinkt nachts auf 30 - 35 l/s. Bei einer Abkühlung um 4 K entspricht dies noch einer Leistung von 500 - 590 kW. Im Vergleich dazu die benötigten Verdampferleistungen:

Wärmepumpen	Verdampferleistungen
Wärmepumpe 1	ca. 780 kW
Wärmepumpe 2	ca. 1'220 kW
<b>total</b>	<b>ca. 2'000 kW</b>

Mit dem 2004 geplanten Anschluss von Rubigen an die ARA Region Münsingen steigt die Abwassermenge um etwa 6 l/s. Je nach Betriebsart fällt das zusätzliche Abwasser jedoch nur tagsüber an. Der Anschluss löst somit den Versorgungs-Engpass nicht.

Die beiden zugehörigen Plattenwärmetauscher sind auf Leistungen von 836 kW und 950 kW ausgelegt. Für den Betrieb der kleineren Wärmepumpe kann der Wärmetauscher 1 oder 2, für den Betrieb der grösseren Wärmepumpe müssen beide Tauscher gleichzeitig eingesetzt werden.

Auch gereinigtes Abwasser enthält noch gelöste und ungelöste Feststoffe. Diese lagern sich in den Plattenwärmetauschern trotz vorgeschalteten Rückspül-Filtern ab und führen dazu, dass jeder Wärmetauscher jährlich 6 - 8 mal gereinigt werden muss. Bei einem Einsatz von 1.5 - 2.5 Mann-Tagen je Reinigung entspricht der Aufwand für die Reinigung der Tauscher ca. Fr. 15'000.--/Jahr. Die Reinigungen haben je nach Betriebsart entsprechende Betriebsunterbrüche bei den Wärmepumpen zur Folge.

Mit dem aktuellen und dem auf 2005 geplanten Ausbau der ARA (Inbetriebsetzung der Nachklärbecken) wird sich die Wasserqualität verbessern. Mit der besseren Wasserqualität nimmt auch der Reinigungsaufwand ab.

Mit dem Ausbau der ARA wird jedoch auch der Standort der Entnahmestelle des gereinigten Abwassers und der Plattenwärmetauscher in Frage gestellt. Seitens ARA ist der Planungsprozess 2003/2004 soweit fortgeschritten, dass diesbezüglich genaue Aussagen gemacht werden können.

In diesem Zusammenhang muss dann geprüft werden, ob nicht geeignetere, wartungsfreundlichere Wärmetauscher, z.B. Geradrohr-Wärmetauscher oder solche mit integrierter mechanischer Reinigung, eingesetzt werden sollten.

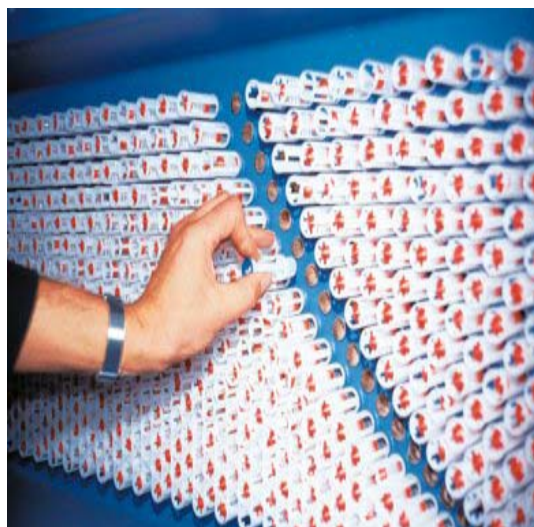


**Abb. 1**

Beispiel Rohrbündel-Wärmetauscher

**Abb. 2**

Beispiel mechanisches Reinigungssystem in Geradrohr-Wärmetauscher, bestehend aus Bürstchen (rot), die bei Umkehr der Fliessrichtung durch die Tauscherrohre gespült werden, dabei Ablagerungen lösen und anschliessend im Körbchen (weiss) landen.



### **3.2.2. Alternative Wärmequellen**

Mit dem Anliegen der integralen Betrachtung lud die Dr. Eicher+Pauli AG am 6. November 2002 die Herren

- Jungen, EWV Münsingen
- Sterchi, Betriebsleiter ARA Region Münsingen
- Mathys, Bonnard&Gardel
- Niederberger, Bauverwaltung Münsingen
- Estermann, Composto+

zu einer Informations- und Koordinationssitzung ein. Dabei wurden verschiedene alternative Wärmequellen besprochen.

#### **Blockheizkraftwerk (BHKW)**

Die ARA verbrennt in zwei BHKWs Klärgas und erzeugt dabei Strom. Die gleichzeitig anfallende Abwärme wird soweit möglich für Eigennutzung eingesetzt. Die an Begehungen gemachten Beobachtungen, dass Überschusswärme mit einem Notkühler vernichtet wird, bestätigte Herr Sterchi.

Mit steigender Aussentemperatur nimmt der Eigenbedarf der ARA ab und die Überschusswärme zu. Das durch die ZWPA nutzbare Potential an Überschusswärme liegt trotz vorgesehener Optimierungsmassnahmen seitens ARA bei 220 MWh/a. Die Nutzung der Überschusswärme kann mit ca. Fr. 60'000.-- realisiert werden.

#### **Schlamm**

Der bei der Abwasserreinigung anfallende Schlamm hat im Faulturm und vor der Zentrifuge eine Temperatur  $\geq 35^{\circ}\text{C}$  und kann für die ZWPA beschränkt als Wärmequelle genutzt werden. Das Potenzial liegt bei 120 MWh/a bei einem gleichzeitigen Einsatz elektrischer Energie für die Schlammumwälzung von 70 MWh/a. Die Investitionskosten für die Nutzung liegen bei Fr. 180'000.--. Diese Lösung soll darum nicht weiterverfolgt werden.

#### **Druckluft**

Die ARA setzt für die Belüftung des Abwassers 3 Druckluftkompressoren mit einer elektrischen Leistung von total 100 kW ein. Die dabei entstehende Abwärme von 290 MWh/a könnte mit ca. Fr. 60'000.-- für die ZWPA nutzbar gemacht werden. Eine Auskoppelung ist jedoch leider nicht möglich, da die Wärme in der Druckluft für die Biologie benötigt wird.

## Kompostieranlage

Die Bauverwaltung verfolgt ein Projekt zur Kompostierung von Grünabfällen. Als möglicher Standort gilt das Gelände der ARA. Der erwartete Grüngut-Anfall liegt bei 3'000 t/a. Die während der Heizperiode aus der Kompostierung nutzbare Wärme liegt bei 300 MWh/a. Die Nutzung kann mit ca. Fr. 110'000.-- realisiert werden.

Gemäss Herr Estermann ist nach der Kompostierung eine Vergärung mit Produktion von Biogas erst bei einem Grüngut-Anfall von 10'000 t/a sinnvoll. Es ist vorgesehen, den vergärbaren Kompost einer grösseren Anlage zuzuführen und nicht selber zu vergären.

## Grundwasser

Die ARA besitzt einen eigenen Grundwasser-Entnahmehrunnen im Betriebsgebäude. Das Grundwasser wird für Prozesszwecke eingesetzt. Die konzessionierte Grundwassermenge beträgt 500 l/min. Die ARA plant eine Erhöhung der Entnahmemenge auf 1'000 l/min und baut zu diesem Zweck den Brunnen im Frühjahr 2003 aus.

Gemäss Untersuchungen von Geotest hat der bestehende Brunnen bei konstanter Fördermenge eine Kapazität von 1'100 - 1'200 l/min. Die gleichen Untersuchungen weisen für das Gebiet zwischen Giesse und Aare nordwestlich der ARA eine Ergiebigkeit von mindestens 3'500 - 4'000 l/min aus.

Diese enorme Ergiebigkeit ergibt sich auch aus der Infiltration von Aare und Giesse. Die Infiltration wirkt sich auf den Temperaturverlauf des Grundwassers aus. So kann bei grosser Entnahmemenge die Grundwassertemperatur im März auf den Tiefststand von 7°C (im März infolge Phasenverschiebung) absinken. Diese Grundwassertemperaturen führen wieder zu einer Zwangsabschaltung der Wärmepumpen durch den Frostwächter.

Bei Substitution des gereinigten Abwassers durch Grundwasser müssen für den gleichzeitigen Betrieb der beiden Wärmepumpen 6'200 l/min gefördert werden können.

<b>Wärmepumpe</b>	<b>Grundwasser</b>
Wärmepumpe 1	2'000 l/min
Wärmepumpe 2	4'200 l/min
<b>total</b>	<b>6'200 l/min</b>

Diese Menge liegt deutlich über der ausgewiesenen Ergiebigkeit. Gemäss Herr Soom, Geotest, könnte eine Förderung in dieser Grössenordnung noch möglich sein. Genauere Aussagen sind mit vertieften hydrogeologischen Abklärungen machbar.

Einschränkend ist zu erwähnen, dass bei dieser Entnahmemenge die Infiltration aus Aare und Giesse noch verstärkt wird und zusätzlich bei tiefem Grundwasserstand die Naturschutzgebiete im Einzugsgebiet trocken gelegt werden können.

### **Standort der Entnahme**

Sinnvoll wäre die Grundwasserentnahme in der Nähe der Wärmepumpen. Gemäss den bereits erfolgten hydrogeologischen Untersuchungen besteht jedoch in der näheren Umgebung der Schlossmatt keine Möglichkeit, die erforderliche Menge zu fördern (ungenügende Ergiebigkeit).

Also drängt sich ein Standort rund um die ARA auf. Die Reichweite des bestehenden Entnahmebrunnens der ARA liegt bei 280 m. Beim Bau eines zweiten Entnahmebrunnens für die ZWPA müsste dieser somit mehr als 600 m von jenem im Betriebsgebäude entfernt sein, damit keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet.

Die Lösung liegt in der Stilllegung des ARA-Brunnens und die Versorgung der ARA mit Grundwasser aus der Entnahme für die ZWPA. Das von der ARA benötigte Grundwasser wird dann zuerst durch die ZWPA abgekühlt und steht anschliessend der ARA als Prozesswasser zur Verfügung.

### **3.2.3. Varianten**

#### **Ist-Zustand**

Die Anlage wird wie bisher weiterbetrieben. Die Wärmepumpen müssen in Abhängigkeit der anfallenden Wassermenge und -temperatur in der ARA zu- und weggeschaltet werden. Ein Parallel-Betrieb beider Wärmepumpen ist weiterhin nicht möglich. Es werden keine Investitionen getätigt. Aufwand für Betrieb/Wartung/Unterhalt wie bisher. Es besteht ein hohes Risiko von Unterdeckung oder Versorgungslücken beim Ausfall eines Wärmeerzeugers.

#### **Variante 1**

Die bestehende Anlage wird mit einem 2. Heizkessel (Leistung 1'450 kW) ergänzt. Der Wärmepumpen-Betrieb mit entsprechender Wartung der Plattenwärmetauscher erfolgt reduzierter. Leistungsspitzen und Unterbrüche werden vermehrt durch die Heizkessel aufgefangen. Mit dem zweiten Heizkessel wird eine Redundanz von mindestens 85% erreicht. Die Reaktionszeit erhöht sich.

#### **Variante 2**

Anstelle eines 2. Heizkessels wird die bestehende Anlage mit einer Grundwasser-Nutzung für den Betrieb der grossen Wärmepumpe ergänzt. Der Parallel-Betrieb beider Wärmepumpen ist möglich. Die Nutzung der Abwärme aus dem gereinigten Abwasser erfolgt mit der kleinen Wärmepumpe in Abhängigkeit der Wassermenge- und -temperatur in der ARA. Die durch die Wärmepumpen erreichte Redundanz beträgt mindestens 45%.

#### **Variante 3**

Die Nutzung der Abwärme aus dem gereinigten Abwasser wird für die nächsten Jahre - bis zur gesteigerten Reinigungsleistung der ARA - stillgelegt. Mit einer Grundwasser-Nutzung kann die kleine oder die grosse Wärmepumpe betrieben werden (kein Parallel-Betrieb möglich). Der Aufwand für Wartung/Unterhalt reduziert sich. Die durch die Wärmepumpen erreichte Redundanz beträgt mindestens 45%.

#### **Variante 4**

Die Nutzung der Abwärme aus dem gereinigten Abwasser in der ARA wird stillgelegt. Mit einer erweiterten Grundwasser-Nutzung können beide Wärmepumpen parallel betrieben werden. Die erforderliche Grundwassermenge bedingt voraussichtlich 2 Entnahmebrunnen. Umfangreiche Abklärungen über die Machbarkeit sind zwingend. Temperaturbedingte Abschaltung der Wärmepumpen (erhöhte Infiltration von Aare und Giesse) im Februar/März ist möglich. Die Redundanz beträgt 45 %.

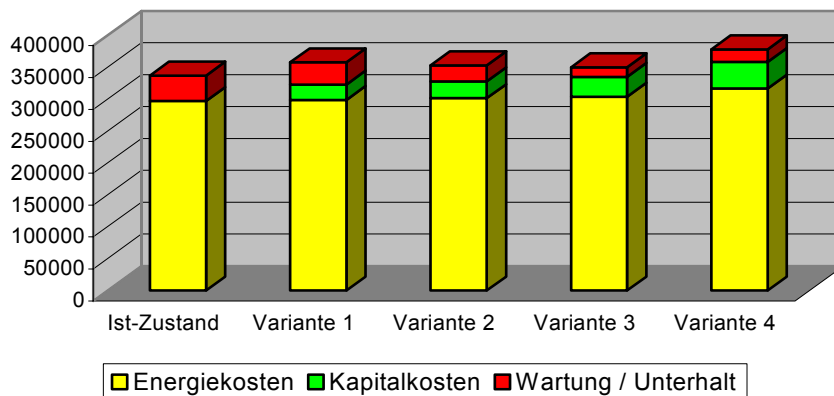
## Varianten-Vergleich

	Ist-Zustand	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	
		Einbau von 2. Heizkessel mit 1'450 kW. Reduzierter WP-Betrieb	Grundwassernutzung für grosse Wärmepumpe; kleine WP weiterhin mit gereinigtem Abwasser	Grundwassernutzung für kleine oder grosse WP; Nutzung gereinigtes Abwasser stillgelegt	Grundwassernutzung für kleine und grosse WP; Nutzung gereinigtes Abwasser stillgelegt	
<b>Energiekosten</b>						
Grundwassermenge	30000	0	300'000	550'000	600'000	m3/a
Grundwasser	0	0	4'200	4'200	6'200	l/min
Wärmeproduktion WP	3'900	3'500	4'100	3'900	4'200	MWh/a
Wärmeproduktion Öl	900	1'300	700	900	600	MWh/a
Ölpreis	45.--	45.--	45.--	45.--	45.--	Fr./MWh
Ölkosten	40'500.--	58'500.--	31'500.--	40'500.--	27'000.--	Fr./a
Wasserrechtszins	0.--	0	1.--	1.--	1.--	Fr./l/min
Wasserverbrauchszins	0	0.000	0.005	0.005	0.005	Fr./m3
Wasserkosten	120.--	0.--	5'700.--	6'950.--	9'200.--	Fr./a
Strompreis	160.--	160.--	160.--	160.--	160.--	Fr./MWh
Stromverbrauch HA	1'600	1'500	1'650	1'600	1'750	MWh/a
Stromverbrauch WPA	1'480	1'360	1'550	1'480	1'650	MWh/a
Stromverbrauch WP	1'200	1'075	1'250	1'200	1'300	MWh/a
Stromkosten	256'000.--	240'000.--	264'000.--	256'000.--	280'000.--	Fr./a
Energiekosten	296'620.--	298'500.--	301'200.--	303'450.--	316'200.--	Fr./a

<b>Kapitalkosten</b>						
Nutzungsdauer	0	15	20	20	20	Jahre
Investitionskosten	0	250'000.--	450'000.--	450'000.--	600'000.--	Fr.
Konzession	0	0.--	30'000.--	30'000.--	40'000.--	Fr.
Subventionen	0	0.--	150'000.--	90'000.--	120'000.--	Fr.
Kapitalzins	0	5	5	5	5	%
Annuitätsfaktor	0	0.096	0.080	0.080	0.080	-
Kapitalkosten	0.000	24'000.--	26'400.--	31'200.--	41'600.--	Fr./a

<b>Jahreskosten</b>						
Energiekosten	296620	298'500.--	301'200.--	303'450.--	316'200.--	Fr./a
Kapitalkosten	0.--	24'000.--	26'400.--	31'200.--	41'600.--	Fr./a
Wartung / Unterhalt	40'000.--	35'000.--	25'000.--	15'000.--	20'000.--	Fr./a
<b>Jahreskosten</b>	<b>336'620.--</b>	<b>357'500.--</b>	<b>352'600.--</b>	<b>349'650.--</b>	<b>377'800.--</b>	<b>Fr./a</b>
<b>Wärmekosten</b>	<b>7.0</b>	<b>7.4</b>	<b>7.3</b>	<b>7.3</b>	<b>7.9</b>	<b>Rp./kWh</b>

## Jahreskosten



### 3.2.4. Transportleitung

Die PVC-Leitung zwischen ARA und Heizzentrale hat eine Länge von mehr als 2'200 m. Bei der ARA und bei der Heizzentrale hat sie Aussen-/Innendurchmesser 280/229 mm, dazwischen 315/289 mm. Die Anschlüsse der Plattenwärmetauscher und der Verdampfer sind noch einmal abgestuft.

Ist-Zustand, kein Parallel-Betrieb der Wärmepumpen möglich:

Teilstrecke	Volumenstrom	Geschwindigkeit	Druckverlust
Plattentauscher 1	130 m <sup>3</sup> /h	2.72 m/s	53 kPa
Plattentauscher 2	350 m <sup>3</sup> /h	3.66 m/s	159 kPa
280/229 mm	350 m <sup>3</sup> /h	2.36 m/s	58 kPa
315/285 mm	350 m <sup>3</sup> /h	1.52 m/s	139 kPa
Wärmepumpe 1	130 m <sup>3</sup> /h	2.72 m/s	138 kPa
Wärmepumpe 2	350 m <sup>3</sup> /h	3.66 m/s	238 kPa
<b>maximal</b>	<b>350 m<sup>3</sup>/h</b>		<b>598 kPa</b>

Die obige Tabelle zeigt auf, dass mit Ausnahme der Leitung  $\varnothing$  315/285 mm die Anlageteile eher knapp dimensioniert sind. Die Förderung des Wassers zwischen den Plattenwärmetauschern und den Wärmepumpen hat bisher einen Energieaufwand von ca. 278 MWh/a oder Fr. 44'000.--/a vorausgesetzt. Dies entspricht 10.7 % des bisherigen durchschnittlichen Wärmeentzuges. Dieser Wert ist sehr hoch; wenn er mit der Arbeitszahl von 3 gewichtet wird, beträgt er 32.1 %!

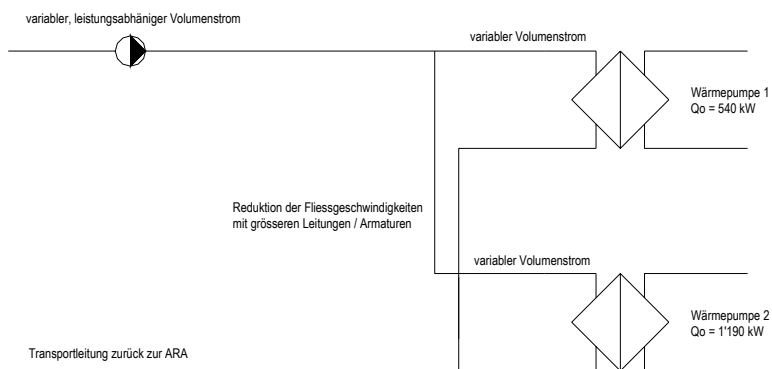
Dieser hohe Stromverbrauch zur Erschliessung der Wärmequelle senkt die Jahresarbeitszahl auf 2.6, was ungenügend ist. Ohne die Förderpumpe würde ein Wert von 3.2 erreicht.

Das Optimierungspotential liegt in der angepassten Fördermenge. Mit einer leistungsabhängigen Drehzahlregulierung kann der Energieaufwand um mind. 50 MWh/a oder ca. Fr. 8'000.--/a gesenkt werden. Die Optimierung ist jedoch nur möglich, wenn die Strömungswächter der Wärmepumpen Schwankungen von 30 - 100 % zulassen. Für den Umbau sind je nach Lösung zwischen Fr. 50'000.-- und Fr. 80'000.-- aufzuwenden.

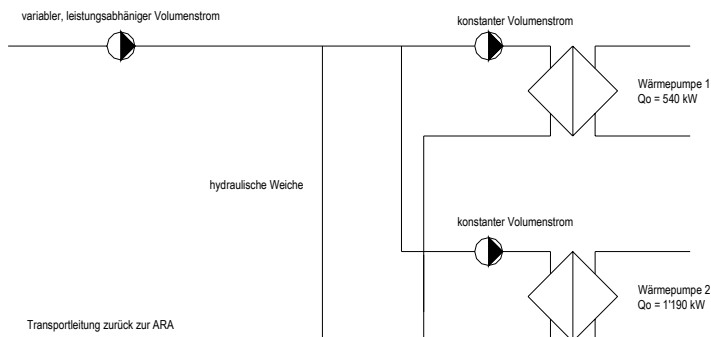
Die oben aufgeführten Druckverluste verlangen entsprechend dimensionierte Pumpen. Die resultierenden Drücke führen dazu, dass beim Betrieb der grösseren Umwälzpumpe die kleinere kein Wasser über die Wärmepumpe 1 zu fördern vermag.

Dies ist der zweite Grund, warum nicht beide Wärmepumpen gleichzeitig betrieben werden können.

Lassen die Wärmepumpen über die Verdampfer einen variablen Volumenstrom zu, kann das Problem durch das Versetzen der Pumpe behoben, bzw. das Optimierungspotential mit einem Pumpen-Ersatz realisiert werden. Die Kosten für die Optimierung betragen ca. Fr. 50'000.--.



Verlangen die Verdampfer konstante Volumenströme, muss eine weitere Pumpe und eine Entkoppelung von Transportleitung und Verdampferanschlüssen mittels hydraulischer Weiche eingebaut werden. Das Optimierungspotential geht teilweise verloren. Die Kosten für die Optimierung betragen ca. Fr. 70'000.--.



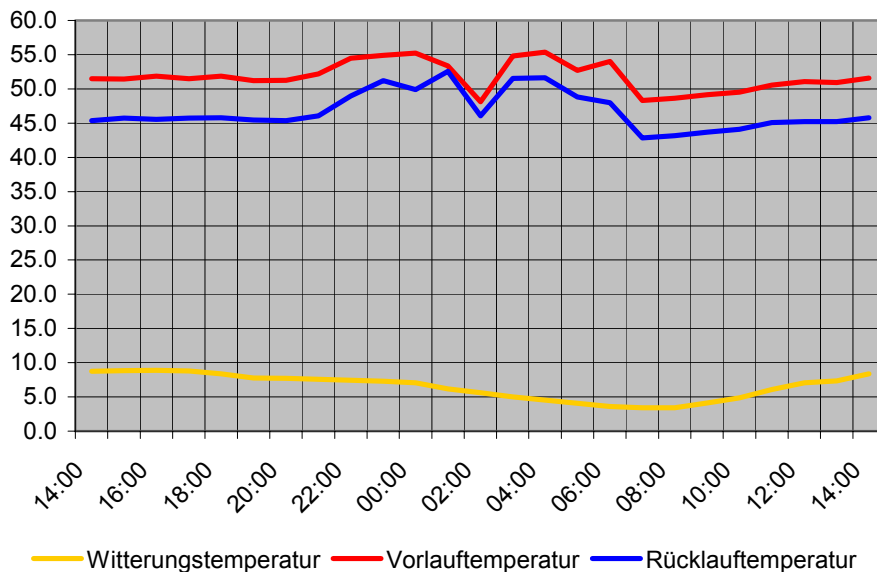
### 3.2.5. Speicher

Der technische Speicher in der Heizzentrale wirkt als Weiche. Er soll Wärmepumpen und Fernleitungen hydraulisch entkoppeln. Mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 1.0 m/s und einem Druckverlust von über 6 kPa ist diese Funktion nur noch bedingt gegeben. Durch das Fehlen dieser Funktion kann eine gegenseitige Beeinflussung von Erzeuger und Verbraucher entstehen.

Wir empfehlen einen Betrieb auf Zusehen hin. Sollten sich Schwierigkeiten begeben, sind diese lokal begrenzt und können z.B. im Gleichschritt mit der Vergrößerung des Speichervolumens behoben werden.

### 3.2.6. Kondensationstemperaturen

Die nachstehende Grafik zeigt, dass die Kondensationstemperaturen der beiden Wärmepumpen nicht in Abhängigkeit der Witterungstemperatur geschoben werden. Mit einer Schiebung kann die Leistungsziffer markant gesteigert werden. Die Machbarkeit der Schiebung sollte unbedingt überprüft werden.

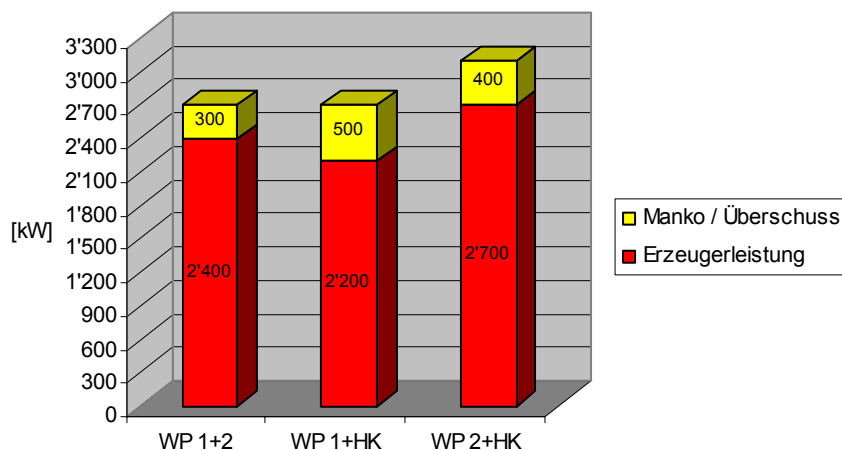


### 3.2.7. Abgas-Rekuperator

Der bestehende Heizkessel ist mit einem Abgas-Rekuperator ausgerüstet. Über diesen Anlagen-Teil werden die Rauchgase kondensiert und die anfallende Wärme zurückgewonnen. Der Einbau des Rekuperators in den Vorlauf lässt diese Nutzung - bedingt durch die höheren Betriebstemperaturen - nur beschränkt zu. Der Einsatz wird durch den Einbau in den Rücklauf effizienter. Das zusätzliche Potential liegt bei ca. 100 MWh/a und ist mit ca. Fr. 30'000.-- realisierbar.

### 3.3. Redundanzen

Mit dem Anschluss der Bärenmatte wird der Spitzenbezug bei 2'700 kW liegen (Aussentemperatur  $-8^{\circ}\text{C}$ ). Die Erzeuger-Kombination Wärmepumpe 2 und Heizkessel können diesen ohne weiteres abdecken.



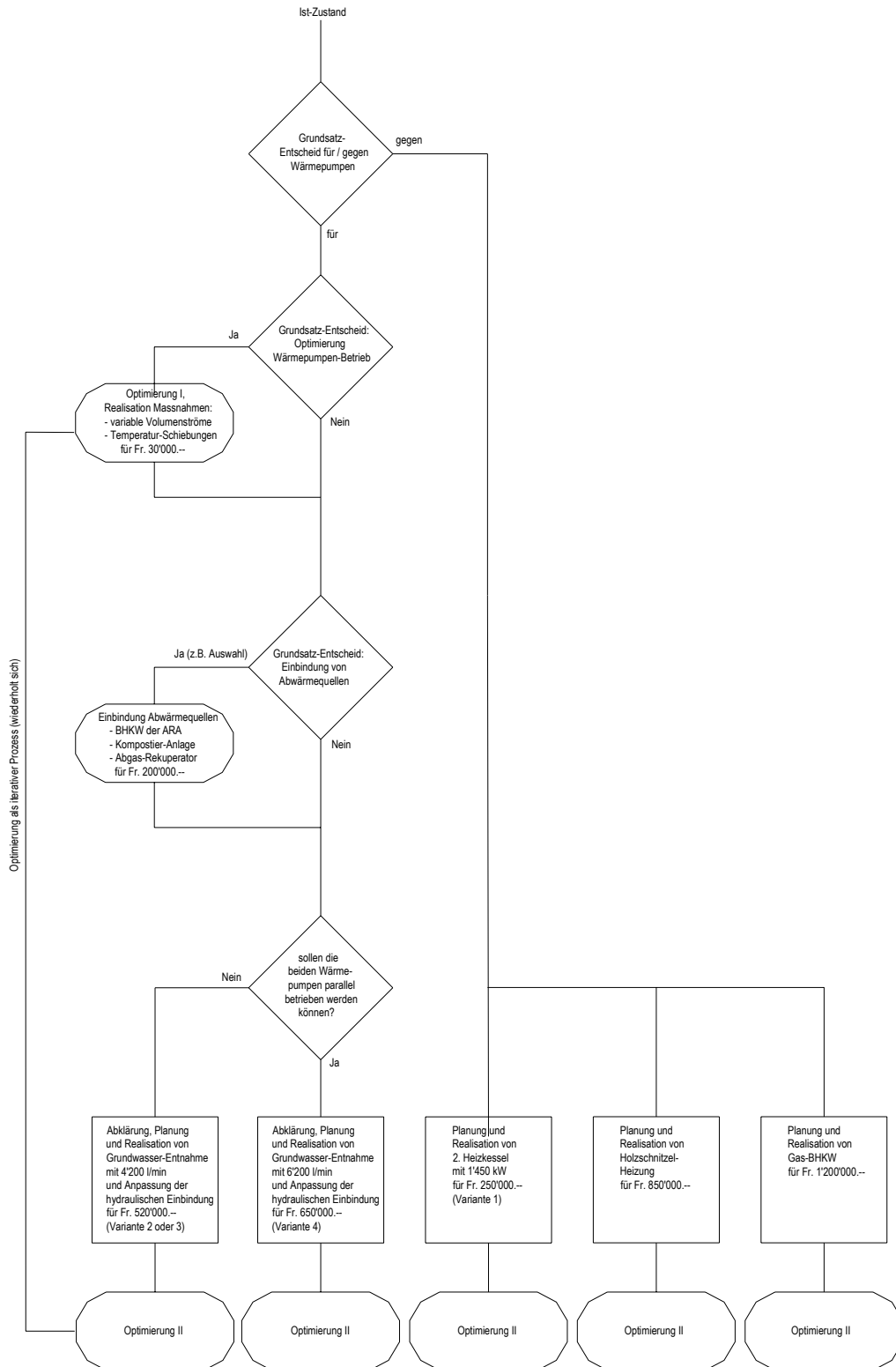
Erzeuger-Kombination	Abdeckung bis Aussentemperatur
Wärmepumpe 1 + 2	$-5^{\circ}\text{C}$
Wärmepumpe 1 + Heizkessel	$-3^{\circ}\text{C}$

Die obigen Werte lassen auf eine hohe Versorgungssicherheit schliessen, da das Zusammentreffen von tiefen Witterungstemperaturen und Ausfall von mehr als einem Wärmeerzeuger eine kleinere Wahrscheinlichkeit aufweist.

Soll das Risiko eines Versorgungs-Engpasses reduziert werden, bieten sich mehrere Möglichkeiten an:

Erzeuger-Varianten	Bemerkungen
Einbau eines zweiten Heizkessels in die Heizzentrale	einfache, kostengünstige, Lösung ca. Fr. 250'000.--
Trennung der Grünabfälle bei der Kompostieranlage in der ARA und Verbrennung der Grünschnitzel aus Ästen/Baumteilen	unterhaltsintensive Lösung ca. Fr. 850'000.--
Wärmeerkraftkoppelung (BHKW) mit Erdgas, wenn Gasleitung ins Ortszentrum verlegt wird	verlangt hohe Betriebsstunden und konkurrenziert so die Wärmepumpen ca. Fr. 1'200'000.--

# 4. Entscheidungsweg



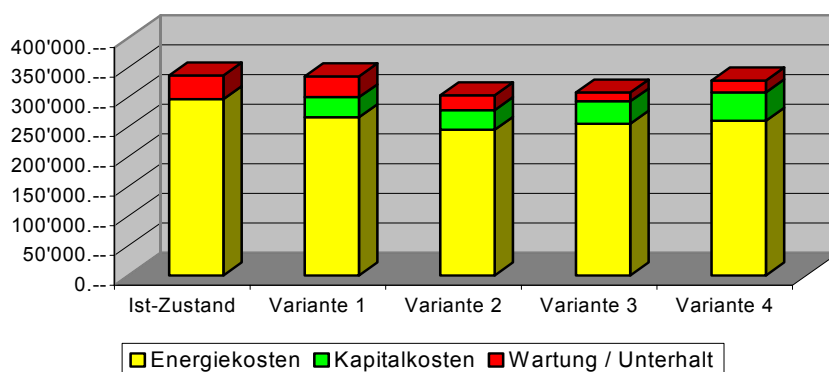
### Variantenvergleich bei optimiertem Wärmepumpen-Betrieb:

	Ist-Zustand	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	
	ohne Optimierung des Wärmepumpen-Betriebes	Einbau von 2. Heizkessel mit 1'450 kW. Reduzierter WP-Betrieb	Grundwassernutzung für grosse Wärmepumpe; kleine WP weiterhin mit gereinigtem Abwasser	Grundwassernutzung für kleine oder grosse WP; Nutzung gereinigtes Abwasser stillgelegt	Grundwassernutzung für kleine und grosse WP; Nutzung gereinigtes Abwasser stillgelegt	
Energiekosten						
Grundwassermenge	30'000	0	300'000	550'000	600'000	m3/a
Grundwasser	0	0	4'200	4'200	6'200	l/min
Wärmeproduktion WP	3'900	3'500	4'100	3'900	4'200	MWh/a
Wärmeproduktion Öl	900	1'300	700	900	600	MWh/a
Ölpreis	45.--	45.--	45.--	45.--	45.--	Fr./MWh
Ölkosten	40'500.--	58'500.--	31'500.--	40'500.--	27'000.--	Fr./a
Wasserrechtszins	0	0	1.--	1.--	1.--	Fr./l/min
Wasserverbrauchszins	0.004	0.000	0.005	0.005	0.005	Fr./m3
Wasserkosten	120.--	0.--	5'700.--	6'950.--	9'200.--	Fr./a
Strompreis	160.--	160.--	160.--	160.--	160.--	Fr./MWh
Stromverbrauch	1'600	1'300	1'300	1'300	1'400	MWh/a
Stromverbrauch WPA	1'480	1'160	1'200	1'200	1'300	MWh/a
Stromverbrauch WP	1'200	1'000	1'140	1'100	1'180	MWh/a
Stromkosten	256'000.--	208'000.--	208'000.--	208'000.--	224'000.--	Fr./a
Energiekosten	296'620.--	266'500.--	245'200.--	255'450.--	260'200.--	Fr./a

Kapitalkosten						
Nutzungsdauer	0	15	20	20	20	Jahre
Investitionskosten	0	350'000.--	550'000.--	550'000.--	700'000.--	Fr.
Konzession	0	0.--	30'000.--	30'000.--	40'000.--	Fr.
Subventionen	0	0.--	165'000.--	110'000.--	140'000.--	Fr.
Kapitalzins	0	5	5	5	5	%
Annuitätsfaktor	0	0.096	0.080	0.080	0.080	-
Kapitalkosten	0.--	33'600.--	33'200.--	37'600.--	48'000.--	Fr. / a

Jahreskosten						
Energiekosten	296'620.--	266'500.--	245'200.--	255'450.--	260'200.--	Fr./a
Kapitalkosten	0.--	33'600.--	33'200.--	37'600.--	48'000.--	Fr./a
Wartung / Unterhalt	40'000.--	35'000.--	25'000.--	15'000.--	20'000.--	Fr./a
<b>Jahreskosten</b>	<b>336'620.--</b>	<b>335'100.--</b>	<b>303'400.--</b>	<b>308'050.--</b>	<b>328'200.--</b>	<b>Fr./a</b>
<b>Wärmekosten</b>	<b>7.0</b>	<b>7.0</b>	<b>6.3</b>	<b>6.4</b>	<b>6.8</b>	<b>Rp./kWh</b>

### Variantenvergleich bei optimiertem WP-Betrieb



Die obige Tabelle und Grafik zeigt das Verhalten der Jahreskosten nach der Optimierung des Wärmepumpen-Betriebes (Anpassung der hydraulischen Einbindung, variable Volumenströme auf der Verdampfer-Seite, sowie Schiebung der Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen).

**Empfehlung Dr. Eicher+Pauli AG:**

Die Resultate führen zur Schlussfolgerung, dass der Wärmepumpen-Betrieb nicht reduziert, sondern optimiert werden sollte. Mit dem Ausbau der ARA nimmt der Aufwand für Wartung/Unterhalt bei der Variante 1+2 weiter ab. Aus diesen Überlegungen empfehlen wir folgendes Vorgehen:

1. Optimierung Wärmepumpen-Betrieb
2. Einbindung weiterer Wärmequellen (z.B. BHKW-Abwärme)
3. Realisation Grundwasser-Nutzung für 4'200 l/min (nur grosse WP)
4. reduzierter Betrieb mit gereinigtem Abwasser  
(oder provisorische Still-Legung bis nach Ausbau der ARA)