

Schlussbericht Dezember 2005

Wärmepumpenanlage mit Erdwärmesonden im Studienzentrum Gerzensee/BE

Sanierung der bestehenden Wärmepumpenanlage

ausgearbeitet durch
Peter Kuhn
Vaterlaus AG
Erlenauweg 6, 3110 Münsingen

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

Zusammenfassung

Im Studienzentrum der Schweizerischen Nationalbank in Gerzensee wurde im Jahre 2002 die Wärmeerzeugung saniert. Acht reparaturanfällig gewordene Luft- Wasserwärmepumpen mit total 180 kW Leistung wurden durch zwei Erdsondenwärmepumpen mit einer Gesamtleistung von 240 kW ersetzt. Der Spaltenlastölheizkessel wurde ebenfalls ausgewechselt. Zudem wurde der Mehrzwecksaal im Schlossgut direkt mit dem Erdsondenfeld gekühlt.

Wärmepumpen mit Erdwärmesonden in dieser Größenordnung sind wegen den hohen Erstellungskosten selten. Dieses Demonstrationsprojekt soll einer an der Technologie interessierten Bauherrschaft über die Funktionstüchtigkeit und Energieeffizienz der Anlage sowie über die Erstellungs- und Betriebskosten Auskunft geben. Ziel des Projekts ist eine vermehrte Ausführung von grossen Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden.

Im Januar 2004 wurde ein Zwischenbericht über das Projekt veröffentlicht. In diesem wurde eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs um 53.8% berechnet. Der Ölverbrauch konnte sogar um 81% gesenkt werden. Der spezifische Energiepreis der Wärmepumpenanlage war jedoch mit den damals tiefen Ölpreisen mit 18.5 Rp/ kWh etwa doppelt so hoch wie der einer reinen Ölheizungsanlage. Da zum Zeitpunkt des Zwischenberichts die Messungen unvollständig waren und durch Schätzungen ergänzt wurden, müssen die Ergebnisse im Schlussbericht verifiziert werden.

Die Energieeffizienz der Anlage wurde als erstes mit dem Vergleich des Endenergieverbrauchs der neuen Wärmepumpenanlage mit dem der alten Anlage und einer konventionellen Ölheizungsanlage nachgewiesen. Dazu wurden die Stromrechnungen der BKW Energie AG und der auf der Anlage gemessene Ölverbrauch benutzt. Mit dem gemessenen Nutzenergieverbrauch konnten die Jahresnutzungsgrade der Anlage bestimmt werden.

Als Ergänzung zu vorstehender Überschlagsrechnung wurden die COP- Werte der beiden Wärmepumpen berechnet und mit Herstellerangaben verglichen. Zudem wurde der Anteil der Wärmepumpen an der Gesamtenergieproduktion berechnet.

Die Erstellungs- und Betriebskosten der Wärmepumpenanlage werden mit denjenigen einer reinen Ölheizungsanlage verglichen.

Die Endenergieeinsparung lag während der beiden Messjahre mit durchschnittlich 49% im Bereich des Zwischenberichts. Der Ölverbrauch konnte um 80% gesenkt werden während der Stromverbrauch trotz der grossen Substitution von Erdöl nur um 3% stieg. Die Wärmepumpenanlage benötigte einen Drittels der Energie einer reinen Ölheizung. Die COP- Werte bewegten sich mit 3.31 für Wärmepumpe 1 und 3.54 für Wärmepumpe 2 bei B8W50 etwa im Rahmen der Herstellerangaben von 3.1 bei B0W50. Auffallend war der hohe Stromverbrauch für Umwälzpumpen in der Heizzentrale. 24.7% der elektrischen Energie wurden für diesen Zweck benötigt.

Der Deckungsgrad der beiden Wärmepumpen betrug im Schnitt 90.7%. Die im Zwischenbericht angestrebten 95% konnten nicht ganz erreicht werden. Tiefe Deckungsgrade wurden vor allem im Sommer für die Warmwasserbereitung und während Kälteperioden im Winter gemessen.

Die Investitionskosten der Erdsondenwärmepumpe sind 3.35 mal so hoch wie diejenigen einer Ölheizungsanlage. Ein grosser Teil der Kosten entfällt auf die Erdsondenanlage. Beim Vergleich der spezifischen Energiepreise war der Unterschied mit 18.4 Rp/kWh für die Wärmepumpe gegenüber 14.8 Rp/kWh für die Ölheizung dank der hohen Erdölpreise weniger ausgeprägt.

Die betrieblichen Erfahrungen mit der Anlage sind positiv. Störungen traten vor allem im ersten halben Jahr nach der Inbetriebnahme auf, die durch Nachregulierungen behoben werden konnten. Als Gewinn für das Studienzentrum erwies sich die Kühlung des Mehrzwecksaales. Dieser konnte für Anlässe benutzt werden, die früher wegen den zu hohen Raumtemperaturen undenkbar gewesen wären. Das Erdsondenfeld lieferte für die Kühlbatterie in der Lüftungsanlage konstante Vorlauftemperaturen um 11°C. Als problematisch erwies sich die Warmwasserladung mit der Wärmepumpe. Vor allem im Sommer mussten die ausgedehnten Fernleitungsnetze zuerst auf die

erforderliche Vorlauftemperatur gebracht werden, um die Boiler in den Unterstationen laden zu können. Trotzdem die Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen bis 67°C arbeiteten, kam der Ölheizkessel ungewollt oft zum Einsatz.

Im letzten Teil in diesem Schlussbericht wird auf die Planung von Grosswärmepumpen eingegangen. Wichtig bei der Projektierung ist eine genaue Aufnahme der örtlichen Gegebenheiten. Neben einer möglichst genauen Bestimmung des Wärmeleistungsbedarfes ist eine saubere Abklärung der elektrischen Netzsituation, des Erdsondenfeldes und der baulichen Gegebenheiten enorm wichtig. Fehler und Unterlassungen, die bei kleineren Leistungen ohne Folgen bleiben, führen bei Grosswärmepumpen mit Sicherheit zu Problemen.

Das Anlagekonzept mit Berücksichtigung der Warmwasserbereitung muss seriös erarbeitet werden. Das Temperaturniveau bestehender Heizgruppen ist ebenso aufzunehmen wie die Möglichkeiten für die Warmwasserbereitung. Die Wahl des Kältemittels ist mit dem Anlagekonzept abzustimmen. Anlagen, die längere Zeit über 55°C Vorlauftemperaturen benötigen, sollten nicht mit einem Kältemittel mit einer Einsatzgrenze von 50 – 55°C betrieben werden.

Erdsonden als Wärmequelle haben den Nachteil, dass die pro Jahr entziehbare Wärmemenge begrenzt ist. Läuft eine Wärmepumpe längere Zeit mit 100% Leistung und ist zudem die Sondenlänge zu knapp dimensioniert, kann das Erdreich um die Sonden gefrieren. Das führt dazu, dass die Sonden unbrauchbar werden und die Anlage stillgelegt werden muss. Erdsondenwärmepumpen dürfen daher auf keinen Fall zu knapp ausgelegt werden.

Résumée

Dans le centre d'étude de la Banque nationale Suisse à Gerzensee, la production de chaleur a été assaini en 2002. Huit anciennes pompes à chaleur air/eau de 180 kW puissance ont dû être remplacées par deux pompes à chaleur à sondes géothermiques verticales avec un rendement total de 240 kW. La chaudière à mazout de charge de pointe a été également remplacée. En outre, on utilise les sondes géothermiques pour refroidir le hall à usages multiples.

Des pompes à chaleur à sondes géothermiques d'une telle grandeur sont rares à cause des investissements élevés. Ce projet démontre envers de maître d'ouvrage intéressés que la technologie fonctionne bien et ceci d'une manière énergétiquement raisonnable. De plus, l'intéressé doit être informé en ce qui concerne les frais d'une telle installation. Les exposés dans ce rapport doivent aider et animer à réaliser plus d'installations à sondes géothermiques de telle grandeur.

En janvier 2004, un rapport intermédiaire a été publié sur le projet. Dans celui-ci, une réduction de la consommation d'énergie de 53.8% a été calculée. La consommation de mazout pouvait même être réduite de 81%. Les frais de l'énergie spécifiques de la pompe à chaleur étaient avec 18.5 centime/kWh presque le double de ceux d'une chauffage à mazout avec 9.94 centime/kWh. Ces résultats devaient être vérifiés dans le rapport final parce qu'au moment du rapport intermédiaire les mesures ont été incomplètes et complétées par des estimations.

L'efficacité énergétique de la nouvelle pompe à chaleur est prouvée avec la comparaison de la consommation d'énergie avec celle de la vieille installation et d'une installation de chauffage à mazout, par reprise des notes d'électricité et du besoin de mazout pour la chaudière additif mesurée sur l'annexe. En outre, les valeurs COP des deux machines sont calculées et comparées avec les données du fabricant. De suite, la part des pompes à chaleur dans la production d'énergie totale a été déterminé.

L'économie d'énergie par rapport à l'ancienne pompe à chaleur air/eau s'est trouvée pendant les deux années de mesure avec 49 % dans le secteur du rapport intermédiaire. La consommation de mazout a pu être réduit de 34'800 litres à 6'800 litres par année, ce qui correspond à une réduction de 80%. Malgré à la grande substitution de mazout, la consommation d'énergie électrique montait que de 3%. La pompe à chaleur a besoin un tiers de l'énergie d'un chauffage à mazout.

Les valeurs COP se montent à 3.31 pour la première et à 3.54 pour la deuxième pompe à chaleur chez B8W50. Selon des données du fabricant, une valeur COP de 3.1 devrait être atteinte chez B0W50. La consommation d'énergie électrique pour des pompes de circulation d'eau dans la centrale de chauffage était frappante. 24.7% de l'énergie électrique étaient nécessaires pour atteindre ce but.

Le degré d'efficacité des deux pompes à chaleur s'est élevé à 90.7 %. Les 95 % visés dans le rapport intermédiaire ne pouvait pas être atteint complètement. Des degrés d'efficacité profonds ont été mesurés surtout en été pour la préparation d'eau chaude et pendant des périodes d'hiver. Les investissements de la pompe à chaleur de sondes géothermiques sont 3.35 fois plus élevés que ceux d'une installation de chauffage à mazout. Une grande partie des frais revient à l'installation des sondes géothermiques. La différence des prix énergétiques spécifiques, avec 18.4 centime/kWh pour la pompe à chaleur par rapport à 14.4 centime/kWh pour le chauffage à mazout a été grâce aux prix pétroliers élevés moins empreint qu'au rapport intermédiaire.

Les expériences de service avec l'installation sont positives. Des dérangements sont apparus surtout au cours des premiers six mois après le démarrage qui pouvaient être réparés par des ajustages au système de régulation. Un profit pour le centre d'étude s'est avéré le refroidissement du hall à usages multiples. Celui-ci pouvait être utilisé pour les causes qui auraient été plus tôt inconcevables à cause des températures ambiantes trop hauts. Le champ des sondes géothermiques a livré des températures aller constantes de 11° C pour la batterie frigorifique dans l'installation d'aération.

Le chargement d'eau chaude avec la pompe à chaleur s'est avéré problématique. Surtout en été

les conduites à distance étendus devaient être apportés d'abord sur la température aller nécessaire pour pouvoir charger les boilers dans les sous stations. Bien que les pompes à chaleur travaillent avec des températures aller à 67°C, la chaudière à mazout était involontairement souvent utilisée.

Dans la dernière partie de ce rapport final la planification des pompes à chaleur grandes est évoquée. Une clarification propre des données locales, de la situation du réseau électrique, de la situation sur le champ des sondes géothermiques et des données architecturales est énormément importante. Le besoin de la puissance calorifique doit être disposé le plus précise possible.

Des erreurs et des omissions qui s'en tiennent à de plus petites performances sans conséquences, conduisent pour des pompes à chaleur grandes avec sécurité à des problèmes. Le concept d'installation, la considération de la préparation d'eau chaude et le niveau de température des groupes de chauffage existants doit être élaboré sérieusement.

Le choix du réfrigérant doit être assorti avec le concept d'installation. Des installations qui nécessitent plus de 55°C température aller pendant une période prolongée, ne fonctionnent pas propre avec un réfrigérant avec une frontière d'application de 50-55° C.

Des sondes géothermiques comme source de chaleur ont le désavantage que la quantité de chaleur d'extraction par année est limitée. Si une pompe à chaleur court long temps avec 100% de performance et si la longueur des sondes est dimensionnée trop juste, le sol peut geler autour des sondes. Cela a pour conséquence que les sondes deviennent inutiles. L'installation doit être arrêtée. On doit calculer les pompes à chaleur de sondes géothermiques avec assez de réserve.

Summary

In the study center of the Swiss central bank at Gerzensee (Switzerland), the heat production was reorganized. The eight air-water heat pumps with total heating capacity of 180 kW were replaced by two ground-coupled heat pumps of 120 kW heating capacity each. The earth probes are additionally used for cooling directly the general-purpose hall.

Heat pumps with earth probes are rare in this order of magnitude because of the high production costs. A project was established to give informations at interested owners over the energy efficiency and the production an operating cost of the plant as well.

The energy efficiency is proved by two different ways. Firstly, the energy consumption of the new heating system is evaluated on the base of the electricity bills and the oil consumption for the auxiliary boiler and is compared with the values before the conversion and also with the energy consumption of a conventional oil heating system. Secondly, certain specifications were measured an compared with layout and manufacturers data.

The energy saving improvements compared to the former air-water heat pump system are impressive. The oil consumption is reduced from 34'800 ltr/a to 6'800 ltr/a. Despite of the large substitution of oil by the heat pumps the current electricity demand rose only around 3%. 24.7% of the electricity consumption were needed for circulations pumps.

The coefficient of performance (COP) of the two heat pumps reached with 3.31 for the first and 3.54 (B8W50) for the second one the manufacturers data with 3.1 (B0W50).

The costs for the Heat pump system are 3.35 times as high as those for an oil heating plant. Because of the high oil prices the specific energy price of the heat pump system with 18.4 Rp/kWh was only little higher than that for an oil heating plant with 14.8 Rp/kWh.

The plant functioned trouble-free apart from a few minor exceptions. As profit for the study center proved the free cooling system. The general-purpose hall could be used for causes, which would have been inconceivable in former times because of the too high room temperatures.

Heat pumps with earth probes must be planned accurately. Apart from an exact determination of the thermal output, the careful clarification of the electrical net situation and the local conditions on the probe field and the plant is important.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumée	5
Summary	7
Inhaltsverzeichnis	8
1. Ausgangslage	10
1.1 Sanierungsarbeiten	10
1.1.1 Alte Anlage	10
1.1.2 Die Sanierungsarbeiten	11
1.2 Zwischenbericht vom Januar 2004	13
1.2.1 Energieeffizienz der Anlage	13
1.2.2 Kostenvergleich mit einer konventionellen Anlage	13
1.2.3 Betriebliche Erfahrungen nach dem ersten Jahr	14
1.2.4 Noch offene Probleme	14
2. Ziel der Arbeit	15
3. Lösungsweg	16
3.1 Messdatenerhebung	16
3.2 Nachweis der Energieeffizienz	18
3.2.1 Kontrolle der Energieeinsparung anhand von Strom- und Ölverbrauchszielen	18
3.2.1.1 Vergleichsgrundlage	18
3.2.1.2 Energieverbrauch der neuen Anlage	18
3.2.1.3 Vergleich mit Ölheizungsanlage	19
3.2.1.4 Jahresnutzungsgrad der Anlage	21
3.2.2 Kontrolle einzelner Anlageteile	22
3.2.2.1 COP- Werte und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen	22
3.2.2.2 Deckungsgrad der Wärmepumpen	23
3.2.2.3 Nutzungssgrad des Ölheizkessels	24
3.3 Kostenvergleich zu konventioneller Vergleichsanlage	24
3.3.1 Systemgrenzen	24
3.3.2 Investitionskosten	25
3.3.2.1 Wärmepumpenanlage	25
3.3.2.2 Konventionelle Vergleichsanlage	25
3.3.3 Kosten pro kWh Nutzwärme	25
3.4 Betriebliche Erfahrungen mit der Anlage	26
3.5 Planerische Aspekte	26
3.5.1 Erdwärmesondenfeld	26
3.5.1.1 Planung von Erdsondenanlagen	27
3.5.1.2 Kontrolle der Planungsdaten in Gerzensee	27
3.5.1.3 Temperaturniveau in den Erdsonden	27
3.5.2 Planung von Grosswärmepumpenanlagen	28
3.5.3 Wahl des Kältemittels R134a	28
4. Hauptergebnisse	29
4.1 Nachweis der Energieeffizienz	29
4.1.1 Überschlagsrechnung der Energieeinsparung	29
4.1.2 Kontrolle einzelner Anlageteile	30

4.1.2.1	COP- Werte der Wärmepumpen	30
4.1.2.2	Deckungsgrad der Wärmepumpen	32
4.1.2.3	Nutzungsgrad des Ölheizkessels	33
4.2	Kostenvergleich zu konventioneller Vergleichsanlage	34
4.2.1	Investitionskosten	34
4.2.2	Spezifische Energiepreise in Fr./kWh	36
4.3	Betriebliche Erfahrungen	38
4.3.1	Störungen seit Inbetriebnahme im August 2002	38
4.3.2	Verhalten der Anlage bei verschiedenen Betriebszuständen	38
4.3.3	Unterhalt der Anlage	39
4.3.4	Lärmemissionen	40
5.	Planerische Aspekte	42
5.1	Erdsondenfeld	42
5.1.1	Planen von Erdsondenanlagen	42
5.1.2	Kontrolle der Planungsdaten in Gerzensee	45
5.1.3	Temperaturniveau im Erdsondenkreislauf	46
5.1.3.1	Jahresverlauf der Temperaturen im Sondenkreislauf	46
5.1.3.2	Kühlbetrieb im Sommer	47
5.1.3.3	Verhalten bei Kälteperioden	48
5.2	Planung von Grosswärmepumpen	49
5.2.1	Bewilligungsverfahren, Abklärungen	49
5.2.2	Elektrische Anschlussdaten	49
5.2.3	Bauliche Massnahmen	50
5.2.4	Hydraulische und regeltechnische Vorkehrungen	51
5.2.5	Besonderheiten bei der Installation von Grosswärmepumpen	53
5.3	Wahl des Kältemittels R134a	54
5.3.1	Überblick über Kältemittel	54
5.3.2	Wichtigste Kältemittel für Wärmepumpentechnik	54
5.3.3	Gründe für die Wahl von R134a in Gerzensee	55
5.3.4	Betriebs- und Anlaufströme von R134a	56
6.	Beurteilung der Ergebnisse	58
6.1	Nachweis der Energieeffizienz	58
6.1.1	Entwicklung des Endenergieverbrauchs	58
6.1.2	Kontrolle einzelner Anlageteile	59
6.1.2.1	COP und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen	59
6.1.2.2	Deckungsgrad der Wärmepumpen	60
6.2	Kostenvergleich zu einer reinen Ölheizung	61
6.3	Betriebliche Erfahrungen	62
6.4	Planerische Aspekte	62
6.4.1	Erdsondenfeld	62
6.4.2	Planung von Grosswärmepumpen	63
6.4.3	Wahl des Kältemittels	64
7.	Symbolverzeichnis	66
7.1	Messeinrichtung	66
7.2	Formelzeichen	66
8.	Anhang	68
	Prinzipschema der alten Anlage	68
	Prinzipschema der neuen Wärmepumpenanlage	69

1. Ausgangslage

Im Sommer 2002 wurde im Studienzentrum der Schweizerischen Nationalbank in Gerzensee die Heizungsanlage saniert. Die 8 störanfällig gewordenen Luft- Wasser- Wärmepumpen mit einer Gesamtleistung von 180 kW wurden durch zwei Wärmepumpen mit je 120 kW Leistung und Erdwärmesonden als Wärmequelle ersetzt. Das Erdsondenfeld wurde zudem für die Kühlung des Mehrzwecksaals im Sommer genutzt.

Da Wärmepumpen mit Erdsonden in diesem Leistungsbereich wegen der hohen Erstellungskosten selten sind, wird die Anlage in einem Demonstrationsprojekt des Bundesamtes für Energie auf Energieeffizienz hin untersucht und die getätigten Investitionen mit denen einer konventionellen Ölheizung verglichen.



Bild 1: Studienzentrum der Schweizerischen Nationalbank in Gerzensee
Im Vordergrund die Unterkunftsgebäude, hinten das Schlossgut

1.1 Sanierungsarbeiten

In diesem Kapitel werden die ausgeführten Sanierungsarbeiten an der Anlage kurz beschrieben und dokumentiert.

1.1.1 Alte Anlage

(Gemäss Prinzipschema im Angang)

Die Anlage vor der Sanierung bestand aus 8 Luft- Wasserwärmepumpen à je 22.5 kW Leistung. Die Hydraulik war in einen Nieder- und einen Hochtemperaturbereich unterteilt. Jeder Bereich hatte einen separaten Pufferspeicher mit 5'000 ltr Inhalt, ein eigenes Fernleitungsnetz sowie separate Bereiche in den beiden Unterstationen im Unterkunftsgebäude und im Schlossgut. Die beiden Bereiche versorgten folgende Abnehmer mit Wärme:

- Niedertemperaturbereich: - Raumheizung im Stöckli
 - 3 Bodenheizungsgruppen im Unterkunftsgebäude
 - 4 Raumheizungsgruppen im Schlossgut

- Hochtemperaturbereich: - Warmwasserbereitung im Unterkunftsgebäude
 - Luftheritzergruppen im Unterkunftsgebäude
 - Warmwasserbereitung im Schlossgut
 - Versorgung der Luftheritzer in den Lüftungsmonoblöcken

5 Wärmepumpen waren fest dem Niedertemperaturbereich zugeordnet. 3 Wärmepumpen bedienten den Hochtemperaturbereich, konnten über eine Umschaltung aber auch für den Niedertemperaturbereich verwendet werden.

Als Ergänzungsheizung war eine Ölheizkessel mit 360 kW Leistung vorgesehen. Im Kesselkreislauf war ebenfalls eine Pufferspeicher mit 5'000 ltr Inhalt eingebunden.

1.1.2 Die Sanierungsarbeiten

(gemäss Prinzipschema im Anhang)

Während der Anlagesanierung in den Jahren 2002/ 2003 wurden folgende Änderungen an der Anlage vorgenommen:

1. Ersatz der alten Luft- Wasserwärmepumpen durch 2 Wärmepumpen mit Erdsonden als Wärmequelle. Total wurden 33 Erdsonden mit einer Totallänge von 4765m gebohrt.



Bild 2: Das abhumusierte Erdsondenfeld vor den Bohrarbeiten. Im Hintergrund das Bohrgerät
 Links die 3 Mulden für die Bohrschlammensorgung. 2 davon dienten als Absetzbecken.



Bild 3: Vor dem Einbringen der Sondenrohre



Bild 4: Das Sondenfeld nach den Bauarbeiten

2. Die Unterteilung der Hydraulik in einen Hoch- und Niedertemperaturbereich wurde aufgehoben. Die beiden Pufferspeicher wurden in Serie verrohrt. Die Fernleitungsnetze wurden als zwei Verbrauchergruppen parallel ab den beiden Speichern versorgt.
3. Die alte Regulierung wurde komplett durch eine DDC- Regulierung ersetzt, die über einen Datenbus mit den beiden Unterstationen und der Lüftungszentrale kommunizieren konnte. Dadurch konnte die jeweilige maximal erforderliche Vorlauftemperatur ermittelt und die Wärme-pumpen somit mit dem tiefsten, möglichen Temperaturniveau betrieben werden



Bild 5: Die beiden Wärmepumpen mit den Anschlussleitungen



Bild 6: Der Sondenverteiler mit den beiden Sole-pumpen und der Free- Qoolingpumpe



Bild 7: Die beiden Pufferspeicher 5'000 ltr für die Wärmepumpen und im Hintergrund der Speicher für den Ölheizkessel



Bild 8: Die Fernleitungspumpen mit den Schalt-schränken im Hintergrund

4. Der Ölheizkessel wurde ebenfalls ersetzt. Die hydraulische Einbindung mit dem Pufferspeicher wurde belassen.
5. In der Unterstation waren die drei 2'500 ltr Boiler bisher fest einem Gebäudetrakt zugeordnet. Um Nachladungen während des Tages zu verhindern, wurden die drei Boiler neu in Serie verrohrt.
6. Der Mehrzwecksaal im Schlossgut wurde neu direkt mit dem Erdsondenfeld gekühlt. Dies wurde mit dem Einbau einer Kühlbatterie im Zuluftrkanal der Lüftungsanlage erreicht. Diese ist mit einer neuen Fernleitung ab dem Erdsondenverteiler in der Energiezentrale mit Kühlenergie versorgt worden.

1.2 Zwischenbericht vom Januar 2004

Im Januar 2004 wurde für das Projekt in Gerzensee ein Zwischenbericht erstellt und veröffentlicht. In diesem wird das Studienzentrum der Schweizerischen Nationalbank vorgestellt und die ausgeführten Sanierungsarbeiten an der Heizungsanlage detailliert beschrieben. Der Zwischenbericht ist daher zum Verständnis nachstehender Ausführungen hilfreich.

In einer ersten Abschätzung wurden im Zwischenbericht folgende Daten untersucht:

- Energieeinsparungspotential der Technologie.
- Kontrolle spezifischer Kennwerte wie die COP-Werte und der Deckungsgrad der Wärmepumpenanlage.
- Kostenvergleich zwischen der ausgeführten Anlage und einer konventionellen Ölheizungsanlage mit Berechnung der spezifischen Energiepreise.
- Auflistung der betrieblichen Erfahrungen mit der Anlage nach dem ersten Jahr.

Beim Schreiben des Zwischenberichts waren wegen dem verspäteten Messbeginn noch nicht alle notwendigen Daten vorhanden. Die Berechnungen beruhten daher zum Teil auf Schätzungen und Hochrechnungen. Trotzdem konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

1.2.1 Energieeffizienz der Anlage

Die Entwicklung des Endenergieverbrauches vor und nach der Sanierung wurde aufgrund der Stromrechnungen der BKW Energie AG und des auf der Anlage gemessenen Ölverbrauchs untersucht. Die Auswertungen ergab eine eindrucksvolle Einsparung an Endenergie:

- Der Ölverbrauch konnte von 34'800 ltr auf 6'600 ltr reduziert werden.
- Trotz der massiven Substitution von Erdöl durch die Wärmepumpe konnte der Stromverbrauch ebenfalls um ca. 8% gesenkt werden.
- Die Einsparung an Endenergie betrug 53.9%.

Neben der Gesamtenergieeinsparung wurden die COP- Werte der beiden Wärmepumpen sowie der Anteil der Wärmepumpen an der gesamten Energieproduktion der Anlage untersucht.

- Die COP- Werte erreichten in etwa die vom Hersteller angegebenen Werte. Auffallend waren die um 10% tieferen Werte von Wärmepumpe 1 gegenüber Wärmepumpe 2. Als Folge dieser Erkenntnisse wurde der Kältekreis der ersten Wärmepumpe überprüft und optimiert.
- Für die Periode Februar bis November 2003 konnte ein Deckungsgrad der Wärmepumpenanlage von 90.62% errechnet werden. Projektiert wurde ein Anteil von 87%. Aufgrund der Messungen bis zum Zwischenbericht und der ausgeführten Optimierungsarbeiten an der DDC-Regelung wurde für das zweite Jahr ein Deckungsgrad von 95% erhofft.

1.2.2 Kostenvergleich mit einer konventionellen Anlage

Die Erstellungskosten für die Wärmepumpenanlage wurden im Zwischenbericht detailliert aufgeführt. Zudem wurde ein Kostenvergleich mit einer reinen Ölheizung erstellt und die spezifischen Energiekosten für beide Anlagen errechnet.

- Die für die Sanierungsarbeiten getätigten Investitionen beliefen sich auf Fr. 1'032'400.—. Dies war sechs mal mehr als das was eine reine Ölheizung mit der notwendigen Erweiterung der Öltankanlage gekostet hätte.
- Bei der Berechnung der jährlichen Betriebskosten ergab sich das gleiche Bild. Erst ab einem Ölpreis von Fr. 130.— pro 100 ltr konnte der spezifische Energiepreis ausgeglichen werden. Nach den jüngsten massiven Preiserhöhungen für Erdöl sind Kosten in dieser Grössenordnung nicht mehr auszuschliessen.

1.2.3 Betriebliche Erfahrungen nach dem ersten Jahr

Die Wärmepumpe funktionierte nach der Inbetriebnahme ohne grössere Störungen. Gelegentliche Hochdruckstörungen konnten durch Anpassungen am DDC- Regelsystem behoben werden. Ein Hauptproblem war die Trägheit der ausgedehnten Anlage. Vor allem die Warmwasserbereitung im Sommer bereitete Probleme. Bis das gesamte Fernleitungsnetz die für die Boilerladung notwendige Vorlauftemperatur erreicht hatte, verging fast eine Stunde. Die Wärmepumpen arbeiteten während dieser Zeit mit Vorlauftemperaturen von bis zu 67°C.

1.2.4 Noch offene Probleme

Im Zwischenbericht konnten folgende Fragen noch nicht definitiv behandelt werden:

- Energieeinsparungspotential der Technologie
Da die Messungen durch den verspäteten Messbeginn noch nicht ein volles Jahr abdeckten, wurden diese zum Teil durch Schätzungen oder durch Werte anderer Monate ergänzt. Die Berechnungen vom Zwischenbericht müssen mit effektiven Messdaten verifiziert werden.
- Kostenvergleich mit einer Ölheizungsanlage
Die Nutzung des Erdsondenfeldes zur freien Kühlung des Mehrzwecksaales wurde im Vergleich des Zwischenberichts nicht berücksichtigt. Bei einer Ölheizung müsste für die Kühlung eine Kältemaschine installiert werden. Diese Kosten werden im Schlussbericht zusätzlich in den Vergleich aufgenommen.
Die gestiegenen Erdölpreise werden in der Berechnung der spezifischen Energiepreise ebenfalls berücksichtigt.
- Betriebliche Erfahrungen
Neben der Auflistung der Betriebsstörungen sollen auch die Lärmemissionen, der Bedienungsaufwand sowie die Unterhaltskosten für die Anlage untersucht werden.
- Planerische Aspekte
Die Kühlung des Mehrzwecksaales ab dem Erdsondenfeld wurde erst im zweiten Jahr des Demonstrationsprojektes in Betrieb genommen. Dieser Umstand soll dafür genutzt werden, den Einfluss des Wärmeeintrags im Sommer auf die Soletemperaturen zu untersuchen.
Die Annahmen, die für die Dimensionierung der Anlage getroffen wurden, sollen bestätigt werden. Mit welchen Vorlauftemperaturen für die direkte Kühlenergienutzung ab den Erdwärmesonden kann gerechnet werden? Wie verhalten sich die Soletemperaturen bei Wärmeeintrag und bei längeren Kälteperioden?
Spezielle, während den Sanierungsarbeiten gemachte Erfahrungen sollen aufgelistet werden.

2. Ziel der Arbeit

Warum ist dieses Demonstrationsprojekt mit der zwei Jahre dauernden Messung durchgeführt worden?

Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden als Wärmequelle im kleineren Leistungsbereich werden heute häufig realisiert und gelten als Stand der Technik. Wärmepumpen mit Erdsonden und einer thermischen Leistung von 240 kW wie in Gerzensee sind selten. Der Hauptgrund sind die hohen Erstellungskosten und der grosse Platzbedarf für das Erdsondenfeld.

Mit den positiven Erfahrungen der Bauherrschaft in Gerzensee sollen mögliche Bauherren für diese Technologie gewonnen werden. Weiter sollen die auf der Anlage gemachten Erfahrungen an Planer und Installateure weitergegeben werden.

Folgende Fragen werden im vorliegenden Schlussbericht untersucht:

1. Energieeinsparungspotential der Technologie

- Einsparung an Endenergie gegenüber der alten Anlage
- Kontrolle spezifischer Anlagedaten wie COP-Wert und Deckungsgrad der Wärmepumpen.
- Endenergieverbrauch einer konventionellen Ölheizungsanlage.

2. Kostenvergleich zu einer Ölheizungsanlage

- Investitionskosten für beide Varianten mit Einbezug der Kühlung des Mehrzwecksaales.
- Berechnung der spezifischen Energiekosten für beide Varianten unter Berücksichtigung heute gültiger Energiepreise.

3. Betriebliche Erfahrungen

- Betriebsstörungen seit Inbetriebnahme der Anlage
- Unterhalts- und Betriebskosten für die Wärmepumpenheizung
- Notwendiger Bedienungsaufwand
- Lärmemissionen der Anlage

4. Planerische Aspekte

1. Erdsondenfeld

- Planung von Erdsondenanlagen
- Kontrolle der Planungsdaten in Gerzensee
- Temperaturniveau im Sondenkreis im Jahresverlauf, bei Wärmeeintrag im Sommer (Kühlbetrieb) und bei längeren Kälteperioden (Heizbetrieb).

2. Planung von Grosswärmepumpen

- Notwendige Abklärungen
- Elektrische Anschlussdaten
- Bauliche Massnahmen
- Hydraulische und regeltechnische Vorkehrungen
- Besonderheiten bei der Installation von Grosswärmepumpen

3. Wahl des Kältemittels R134a

- Überblick über die Kältemittel
- Wichtige Kältemittel für die Wärmepumpentechnologie und ihre Eigenschaften
- Gründe für die Wahl von R134a in Gerzensee
- Betriebs- und Anlaufströme von R134a

3. Lösungsweg

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die in Kapitel 2 definierten Projektziele erreicht werden sollen.

3.1 Messdatenerhebung

Die Anlage wurde während zwei Jahren ausgemessen. Da die Quartalsrechnungen der BKW Energie AG ein wichtiger Bestandteil der Auswertungen sind, wurden die beiden Auswertungsjahre auf diese Rechnungen abgestimmt.

Auswertungsperioden:

Jahr 1	Beginn	2. Quartal 2003	01.04.2003
	Ende	1. Quartal 2004	31.03.2004
Jahr 2	Beginn	2. Quartal 2004	01.04.2004
	Ende	1. Quartal 2005	31.03.2004

Messkonzept:

Gemäss dem hydraulischen Anlageschema in Bild 3 werden folgende Energieströme und Temperaturen gemessen:

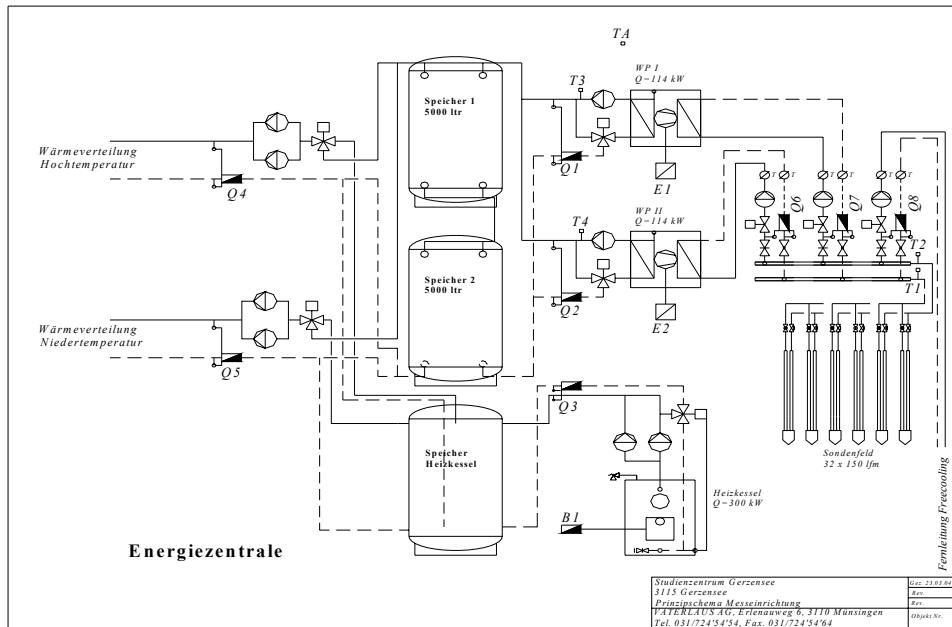


Bild 9: Prinzipschema der Wärmeerzeugung mit Messstellen

Zähler Einbauort

Q1	Kondensatorkreis Wärmepumpe 1
Q2	Kondensatorkreis Wärmepumpe 2
Q3	Ölheizkesselkreis auf Speicher 3
Q4	Fernleitung Hochtemperatur
Q5	Fernleitung Niedertemperatur
Q6	Verdampferkreis Wärmepumpe 2
Q7	Verdampferkreis Wärmepumpe 1
Q8	Free- Qoolingkreislauf
E1	Kraftzuleitung Wärmepumpe 1

Was wird gemessen?

Wärmeabgabe Wärmepumpe 1
Wärmeabgabe Wärmepumpe 2
Wärmeabgabe Ölheizung
Nutzenergie Warmwasser, Lüftungsanlagen
Nutzenergie Raumheizung
Wärmeentzug Erdsonden Wärmepumpe 2
Wärmeentzug Erdsonden Wärmepumpe 1
Wärmeeintrag in Sondenfeld
Stromaufnahme Wärmepumpe 1

E2	Kraftzuleitung Wärmepumpe 2	Stromaufnahme Wärmepumpe 2
B1	Ölversorgung Brenner Heizkessel	Ölverbrauch der Anlage
T1	Temperatur vom Sondenfeld	Vorlauftemperatur Erdwärmesonden
T2	Temperatur zum Sondenfeld	Rücklauftemperatur Erdwärmesonden
T3	Kondensatoraustritt WP 1	Vorlauftemperatur Wärmepumpe 1
T4	Kondensatoraustritt WP 2	Vorlauftemperatur Wärmepumpe 2
T5	Nordfassade Stöckli	Aussentemperatur

Auslesung der Messdaten

Die Messdaten werden über das für die Anlageregulierung installierte DDC-System Unigyr der Firma Siemens alle 5 Minuten ausgelesen und gespeichert. Periodisch wurden die Werte per Modem ausgelesen und auf Excel- Dateien gespeichert.

Vorauswertung

Die ausgelesenen Daten wurden periodisch mit Hilfe von Visual-Basic Programmen auf der Basis von Excel 97 ausgewertet und auf Plausibilität hin überprüft. Berechnet wurden folgende Werte:

1. Reduktion der Messdichte auf eine Stunde. Die Zählerstände zu jeder vollen Stunde wurden auf ein separates Excel Tabellenblatt gespeichert.
2. Auswertung pro Stunde:
 - Grundlage: Zählerstände zu Beginn jeder Stunde
 - COP Werte für Wärmepumpe 1 + 2
 - Deckungsgrad der Wärmepumpe
 - Anlageverluste
 - relative Sondenbelastung in W/m
 - absoluter Wärmeentzug der Sondenanlage in kWh/m
 - Errechnen der Temperaturmittelwerte pro Stunde für T1 – T5
3. Auswertungen pro Tag:
 - Grundlage: Zählerstände zu Beginn jeden Tages
 - COP Werte für Wärmepumpe 1 + 2
 - Deckungsgrad der Wärmepumpe
 - Anlageverluste
 - relative Sondenbelastung in W/m
 - absoluter Wärmeentzug der Sondenanlage in kWh/m
 - Temperaturmittelwerte pro Tag, berechnet aus Stundenwerten
 - Maximal- und Minimalwerte der Temperaturen pro Tag, ermittelt aus Stundenwerten
4. Auswertungen pro Monat
 - Grundlage: Zählerstände zu Beginn jeden Monats um 00:00:00 Uhr
 - COP Werte für Wärmepumpe 1 + 2
 - Deckungsgrad der Wärmepumpe
 - Anlageverluste
 - relative Sondenbelastung in W/m
 - absoluter Wärmeentzug der Sondenanlage in kWh/m
 - Temperaturmittelwerte pro Monat, berechnet aus Tageswerten

Messlücken

Das DDC-System ist für die Regulierung der Anlage installiert worden. Die Erhebung der Messdaten wurde so wiederholt durch Zugriffe auf die Steuerung beeinflusst, so dass Messlücken entstanden. Diese dauerten zum Teil mehrere Tage. Die vom BFE geforderte Messdichte von einer Woche konnte immer gewährleistet werden.

3.2 Nachweis der Energieeffizienz

Wie viel Endenergie kann die eingesetzte Technologie im Vergleich zur alten Anlage und zu einer konventionellen Ölheizung einsparen? Diese Frage wird analog dem Zwischenbericht auf zwei unterschiedlichen Wegen beantwortet:

1. Kontrolle der Energieeinsparung anhand der Stromrechnungen und des Ölverbrauchs vor und nach der Sanierung.
2. Kontrolle einzelner Anlageteile und Planungsdaten:
 - Nachweis des COP-Wertes der Wärmepumpen, Vergleich mit Herstellerangaben.
 - Kontrolle des Deckungsgrades der Wärmepumpen.

3.2.1 Kontrolle der Energieeinsparung anhand von Strom- und Ölverbrauchszahlen

Anhand der Stromrechnungen der BKW sowie des auf der Anlage gemessenen Ölverbrauchs wird die Einsparung an Endenergie gegenüber der alten Anlage ermittelt. Zudem wird der Energieverbrauch für eine Ölheizungsanlage berechnet.

3.2.1.1 Vergleichsgrundlage

Als Vergleichsgrundlage dient der Endenergieverbrauch der alten Anlage mit den acht Luft-Wasserwärmepumpen und einem Ölheizkessel als Zusatzheizung. Diese stammen aus Energiestatistiken.

– Stromverbrauch	211'000 kWh
– Ölverbrauch (34'800 ltr Heizöl pro Jahr)	<u>350'800 kWh</u>
– Endenergieverbrauch total	<u>561'800 kWh</u>

Im Stromkonsum ist neben der Antriebsenergie für die Luft- Wasserwärmepumpen der Verbrauch für sämtliche Umwälzpumpen und übrigen elektrischen Aggregate in der Heizzentrale enthalten.

3.2.1.2 Energieverbrauch der neuen Anlage

1. Stromverbrauch

Stromzähler Nr. 483642 der BKW Energie AG. Mit diesem werden ebenfalls sämtliche Hilfsantriebe in der Energiezentrale gemessen. Der Vergleich zur alten Anlage wird daher nicht verfälscht.

Tabelle 1: Stromverbrauch der Wärmepumpenanlage pro Auswertungsjahr

Jahr	Quartal	Verbrauch HAT	Verbrauch NT	Verbrauch Total
2003	2	17'958 kWh	12'918 kWh	30'876 kWh
2003	3	6'249 kWh	10'275 kWh	16'524 kWh
2003	4	55'221 kWh	22'989 kWh	78'210 kWh
2004	1	64'158 kWh	28'857 kWh	93'015 kWh
Total Jahr 1		143'586 kWh	75'039 kWh	218'625 kWh
2004	2	21'918 kWh	15'015 kWh	36'933 kWh
2004	3	9'531 kWh	8'076 kWh	17'607 kWh
2004	4	44'535 kWh	26'442 kWh	70'977 kWh
2005	1	57'798 kWh	34'614 kWh	92'412 kWh
Total Jahr 2		133'782 kWh	84'147 kWh	217'929 kWh

2. Ölverbrauch

Der Ölverbrauch wurde mit dem Ölmengenzähler vor dem Brenner ermittelt. Die Auslesung

erfolgte per Leitsystem.

Jahr 1	Zählerstand 01.04.2003	4'453.1 ltr
	Zählerstand 31.03.2004	<u>10'453.8 ltr</u>
	Total Verbrauch Jahr 1	<u>6'000.7 ltr</u>
Jahr 2	Zählerstand 01.04.2004	10'453.8 ltr
	Zählerstand 31.05.2005	<u>18'082.8 ltr</u>
	Total Verbrauch Jahr 2	<u>7'629.0 ltr</u>

3.2.1.3 Vergleich mit Ölheizungsanlage

Wie viel Endenergie würde ein Ölheizkessel für die Produktion der gleichen Nutzenergie verbrauchen? Der Endenergieverbrauch der Vergleichsanlage setzt sich aus dem Ölverbrauch, der benötigten Elektrizität für Pumpen, Brenner etc. sowie aus dem Stromverbrauch der Kältemaschine für die Kühlung des Mehrzwecksaales zusammen.

$$E_{\text{Vergleichsanlage}} = Q_{\text{Öl Vergleichsanlage}} + E_{\text{Pumpen, Brenner}} + E_{\text{Kühlung}} \quad [\text{Gl. 1}]$$

$E_{\text{Vergleichsanlage}}$	Endenergieverbrauch der Vergleichsanlage
$Q_{\text{Öl Vergleichsanlage}}$	Endenergieverbrauch Ölheizkessel der Vergleichsanlage
$E_{\text{Pumpen, Brenner}}$	Stromverbrauch für Umwälzpumpen, Brenner etc. in der Heizzentrale
$E_{\text{Kühlung}}$	Stromverbrauch des Kaltwassersatzes für den Mehrzweckraum

Ölverbrauch der Vergleichsanlage

Der Ölverbrauch wird aus der durchschnittlich verbrauchten Nutzenergie für Raumheizung und Warmwasserbereitung und dem Nutzunggrad des Heizkessels berechnet.

$$Q_{\text{Öl Vergleichsanlage}} = \frac{QN_{\text{BW Lüftung 1+2}} + QN_{\text{Heizung 1+2}}}{\epsilon_{\text{Öl}}} \quad [\text{Gl. 2}]$$

$QN_{\text{BW Lüftung 1+2}}$	Mittelwert Nutzenergie für Warmwasser und Lüftung anhand Zähler Q4:
Jahr 1	$dQ4 = 146'630 \text{ kWh}$
Jahr 2	$dQ4 = 169'551 \text{ kWh}$
Mittelwert Jahr 1+2	$dQ4 = 158'091 \text{ kWh}$
$QN_{\text{Heizung 1+2}}$	Mittelwert Nutzenergie für Raumheizung anhand Zähler Q5
Jahr 1	$dQ5 = 492'609 \text{ kWh}$
Jahr 2	$dQ5 = 502'290 \text{ kWh}$
Mittelwert Jahr 1+2	$dQ5 = 497'450 \text{ kWh}$
$\epsilon_{\text{Öl}}$	Nutzungsgrad Ölheizkessel gemäss Messungen am Zusatzheizkessel
Jahr 1	$\epsilon_{\text{Ölheizung}} = 81.3\%$
Jahr 2	$\epsilon_{\text{Ölheizung}} = 85.5\%$
Eingesetzter Mittelwert	$\epsilon_{\text{Ölheizung}} = 83.4\%$

Stromverbrauch für Pumpen, Brenner in der Heizzentrale

Für die Wärmepumpenanlage kann der Gesamtverbrauch an elektrischer Energie für die Umwälzpumpen, Brenner etc. aus der Differenz zwischen dem auf den Rechnungen der BKW Energie AG ausgewiesenen Stromverbrauch der gesamten Heizzentrale und dem mit den

Stromzählern E1 und E2 gemessenen Energieverbrauch für die Kompressoren ermittelt werden.

$$E_{\text{Pumpen, Brenner WP-Anlage}} = E_{\text{Hauptzähler}} - E_{\text{WP1}} - E_{\text{WP2}} \quad [\text{Gl. 3}]$$

$E_{\text{Hauptzähler}}$ Hauptzähler BKW für die Energiezentrale Nr. 483642
 E_{WP1} Unterzähler in der Kraftzuleitung Wärmepumpe 1
 E_{WP2} Unterzähler in der Kraftzuleitung Wärmepumpe 2

Tabelle 2: Stromverbrauch für Umwälzpumpen in der Heizzentrale für Wärmepumpenanlage

Quartal	$E_{\text{Hauptzähler}}$	E_{WP1}	E_{WP2}	$\Sigma E_{\text{WP1+2}}$	$E_{\text{Pumpen, Brenner}}$
2 2003	30'876 kWh	12'221 kWh	11'091 kWh	23'312 kWh	7'564 kWh
3 2003	16'524 kWh	3'490 kWh	7'817 kWh	11'307 kWh	5'217 kWh
4 2003	78'210 kWh	32'988 kWh	28'565 kWh	61'553 kWh	16'657 kWh
1 2004	93'015 kWh	36'170 kWh	34'851 kWh	71'021 kWh	21'994 kWh
Jahr 1	218'625 kWh	84'869 kWh	82'324 kWh	167'193 kWh	51'432 kWh
					23.53%
2 2004	36'933 kWh	12'395 kWh	15'398 kWh	27'793 kWh	9'140 kWh
3 2004	17'607 kWh	6'616 kWh	5'610 kWh	12'226 kWh	5'381 kWh
4 2004	70'977 kWh	28'936 kWh	25'622 kWh	54'558 kWh	16'419 kWh
1 2005	92'412 kWh	38'184 kWh	28'782 kWh	66'966 kWh	25'446 kWh
Jahr 2	217'929 kWh	86'131 kWh	75'412 kWh	161'543 kWh	56'386 kWh
					25.87%

Für die weiteren Berechnungen wird der Mittelwert beider Jahre eingesetzt:

$$E_{\text{Pumpen, Brenner}} = 53'900 \text{ kWh}$$

Für die Bestimmung des Stromverbrauchs der Vergleichsanlage muss der für die Wärmepumpenanlage errechnete Stromverbrauch der Nebenantriebe anhand von Schätzungen aufgeteilt werden:

Tabelle 3: Bestimmung Stromverbrauch der Vergleichsanlage

Verbraucher	Wärmepumpenanlage	Vergleichsanlage (nur Heizkessel)
Stromverbrauch für Sole- und Kondensatorpumpen WP1 2300 Betriebsstunden à 4.72 kW WP2 2300 Betriebsstunden à 4.72 kW	21'700 kWh	
Stromverbrauch für Free-Cooling-Pumpe 100 Betriebsstunden à 1.10 kW	100 kWh	
Stromverbrauch für Ölbrenner, Kesselpumpe WP-Anlage: 250 Betriebsstunden à 2.94 kW Vergleichsanlage: 2500 Betriebsstunden à 2.94 kW	700 kWh	7'300 kWh
Stromverbrauch für Raumheizungspumpen und übrige Verbraucher	31'400 kWh	31'400 kWh
Total Stromverbrauch für Nebenantriebe	53'900 kWh	38'700 kWh

Energieverbrauch für Kühlung Mehrzwecksaal

Die Erdwärmesonden werden im Sommer für die Kühlung des Mehrzwecksaales benutzt. Bei der konventionellen Vergleichsanlage müsste dafür eine Kältemaschine und eine Kälteverteilung aufgebaut werden.

Erforderliche Kälteleistung:	Mehrzwecksaal	16.8 kW
	Reserve für andere Räume	<u>10.0 kW</u>
	Total Kühlleistungsbedarf	<u><u>26.8 kW</u></u>

Der Stromverbrauch für die Kühlung wird wie folgt berechnet:

$$E_{\text{Kühlung}} = \frac{Q_0 \text{ MZS}}{\text{EER}} \quad [\text{Gl. 4}]$$

$E_{\text{Kühlung}}$	Stromverbrauch der Kältemaschine
$Q_0 \text{ MZS}$	Kühlenergie Mehrzwecksaal gemäss Zähler Q8 in der Kälteversorgung
Jahr 1	$dQ8 = 79 \text{ kWh}$
Jahr 2	$dQ8 = 991 \text{ kWh}$
EER	Leistungszahl Kältemaschine, eingesetzter Wert 2.6

3.2.1.4 Jahresnutzungsgrad der Anlage

Berechnet wird der verbraucherbezogene Nutzungsgrad der alten Anlage, für die Erdsondenwärmepumpe sowie für die konventionelle Vergleichsanlage. Dieser berechnet sich als Quotient der an die Anlage abgegebenen Nutzwärme zu dem für die Wärmeerzeugung benötigten Öl- und Stromenergie.

1. Alte Anlage

Da der Nutzenergieverbrauch der alten Anlage nicht bekannt ist, wird zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades der mittlere Nutzenergieverbrauch der beiden Messjahre eingesetzt.

$$\varepsilon_{\text{alte Anlage}} = \frac{QN_{\text{BW Lüftung 1+2}} + QN_{\text{Heizung 1+2}}}{Q_{\text{Öl alte Anlage}} + E_{\text{alte Anlage}}} \quad [\text{Gl. 5}]$$

$QN_{\text{BW Lüftung 1+2}}$	Nutzenergieverbrauch für Lüftungsanlage und Warmwasser, Mittelwert für Jahr 1+2
$QN_{\text{Heizung 1+2}}$	Nutzenergieverbrauch für Raumheizung, Mittelwerte für Jahr 1+2
$E_{\text{Öl alte Anlage}}$	Ölenergie der alten Anlage: 34'800 ltr/a = ca. 350'800 kWh
$E_{\text{alte Anlage}}$	Stromverbrauch der alten Anlage = 210'000 kWh. In diesem Verbrauch ist der Strom für die Umwälzpumpen in der Energiezentrale bereits enthalten.

2. Neue Erdsondenwärmepumpe

Der Nutzungsgrad wird für beide Jahre separat berechnet:

$$\varepsilon_{\text{WP Anlage}} = \frac{QN_{\text{BW Lüftung}} + QN_{\text{Heizung}} + Q_0 \text{ MZS}}{Q_{\text{Öl WP Anlage}} + E_{\text{Hauptzähler}}} \quad [\text{Gl. 6}]$$

$QN_{\text{BW Lüftung}}$	Nutzenergieverbrauch für Lüftungsanlage und Warmwasser
QN_{Heizung}	Nutzenergieverbrauch für Raumheizung
$Q_0 \text{ MZS}$	Nutzenergieverbrauch für Kühlung Mehrzweckraum
$Q_{\text{Öl WP Anlage}}$	Ölverbrauch pro Jahr anhand Messungen mit Zähler B1
$E_{\text{Hauptzähler}}$	Stromverbrauch pro Jahr anhand BKW Rechnungen

3. Konventionelle Vergleichsanlage

$$\varepsilon_{\text{Vergleichsanlage}} = \frac{QN_{\text{BW Lüftung 1+2}} + QN_{\text{Heizung 1+2}} + Q_0 \text{ MZS}}{Q_{\text{Öl Vergleichsanlage}} + E_{\text{Pumpen, Brenner}} + E_{\text{Kühlung}}} \quad [\text{Gl. 7}]$$

$QN_{\text{BW Lüftung 1+2}}$	Nutzenergieverbrauch für Lüftungsanlage und Warmwasser Mittelwert für Jahr 1+2
$QN_{\text{Heizung 1+2}}$	Nutzenergieverbrauch für Raumheizung, Mittelwert für Jahr 1+2
$Q_0 \text{ MZS}$	Nutzenergieverbrauch für Kühlung Mehrzweckraum. Wert für Jahr 2
$Q_{\text{Öl Vergleichsanlage}}$	Ölverbrauch pro Jahr anhand Berechnung Gl. 2
$E_{\text{Pumpen, Brenner}}$	Strom für Umwälzpumpen in Energiezentrale gemäss Tabelle 3
$E_{\text{Kühlung}}$	Strom für Kälteproduktion mit Kaltwassersatz gemäss Gl. 4

3.2.2 Kontrolle einzelner Anlageteile

Als Ergänzung zu vorstehender Überschlagsrechnung der Energieeinsparung werden noch folgende Kennwerte ermittelt:

- COP Werte für Wärmepumpe 1 + 2. Vergleich mit Herstellerangaben.
- Anteil der Wärmepumpe an der gesamten Energieproduktion.
- Nutzungsgrad des Ölheizkessels.

3.2.2.1 COP- Werte und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen

Die COP-Werte werden für jede Wärmepumpe wie folgt berechnet:

$$COP_{WP1} = \frac{Q_{WP1}}{E_{WP1}} \quad [\text{Gl. 8}]$$

$$COP_{WP2} = \frac{Q_{WP2}}{E_{WP2}} \quad [\text{Gl. 9}]$$

Q_{WP1}	Wärmeabgabe am Kondensator WP 1, gemessen mit Wärmezähler Q1
Q_{WP2}	Wärmeabgabe am Kondensator WP 2, gemessen mit Wärmezähler Q2
E_{WP1}	Stromverbrauch WP1, gemessen mit Stromzähler in Kraftzuleitung auf Wärmepumpe
E_{WP2}	Stromverbrauch WP2, gemessen mit Stromzähler in Kraftzuleitung auf Wärmepumpe

Die COP- Werte werden auf drei Arten bestimmt:

1. COP - Werte pro Tag.

Auswertungsvorgehen:

- Berechnung der COP- Werte anhand der Zählerstände zu Beginn und am Ende jeden Tages.
- Pro Auswertungsjahr werden die Werte anhand der mittleren Kondensatoraustritts-

temperatur geordnet. Pro °C Vorlauftemperatur werden mittlere COP-Werte berechnet.

- Die Mittelwerte werden in Funktion der Vorlauftemperaturen in einem Diagramm dargestellt.

2. COP- Werte pro Monat

Berechnung der COP- Werte anhand der Zählerstände zu Beginn und am Ende jeden Monats.

3. COP- Werte für Messjahr 1+2; mittlere Jahresarbeitszahl

Berechnung der COP- Werte anhand der Zählerstände zu Beginn und am Ende des jeweiligen Messjahres. Zusätzlich wird pro Wärmepumpe die mittlere Jahresarbeitszahl nach folgender Formel bestimmt:

$$\beta_{J WP1} = \frac{Q_{WP1 (1+2)}}{E_{WP1 (1+2)} + E_{Pu WP}} \quad [Gl. 10]$$

$$\beta_{J WP2} = \frac{Q_{WP2 (1+2)}}{E_{WP2 (1+2)} + E_{Pu WP}} \quad [Gl. 11]$$

$Q_{WP1 (1+2)}$	Mittelwert der Nutzwärmeabgabe für WP1 der beiden Messjahre
$E_{WP1 (1+2)}$	Mittelwert des Stromverbrauchs für WP1 der beiden Messjahre
$\beta_{J WP1}$	Jahresarbeitszahl für Wärmepumpe 1
$Q_{WP2 (1+2)}$	Mittelwert der Nutzwärmeabgabe für WP2 der beiden Messjahre
$E_{WP2 (1+2)}$	Mittelwert des Stromverbrauchs für WP2 der beiden Messjahre
$\beta_{J WP2}$	Jahresarbeitszahl für Wärmepumpe 2
$E_{Pu WP}$	Stromverbrauch der Sole- und Kondensatorpumpen gemäss Berechnung in Kapitel 3.2.1.3.

3.2.2.2 Deckungsgrad der Wärmepumpen

Unter dem Deckungsgrad der Wärmepumpe wird der Anteil der beiden Wärmepumpen an der gesamten Wärmeproduktion der Anlage verstanden:

$$S_{WP} = \frac{\text{Wärmeproduktion Wärmepumpe}}{\text{Wärmeproduktion Gesamtanlage}}$$

$$S_{WP} = \frac{Q_{WP1} + Q_{WP2}}{Q_{WP1} + Q_{WP2} + Q_{Öl WP- Anlage}} \quad [Gl. 12]$$

Q_{WP1}	Wärmeabgabe am Kondensator Wärmepumpe 1
Q_{WP2}	Wärmeabgabe am Kondensator Wärmepumpe 2
$Q_{Öl WP- Anlage}$	Wärmeabgabe Ölheizkessel
Ein Ziel der Anlagesanierung war, den Anteil fossiler Energieträger möglichst tief zu halten. Der Deckungsgrad der alten Luft- Wasserwärmepumpen betrug 50.6%.	

3.2.2.3 Nutzungsgrad des Ölheizkessels

Dieser Wert wird zur Berechnung des Energieverbrauchs der konventionellen Vergleichsanlage benötigt:

$$\varepsilon_{\text{Öl}} = \frac{Q_{\text{Öl WP- Anlage}}}{B_{\text{Öl}} \times H_u} \quad [\text{Gl. 13}]$$

$Q_{\text{Öl WP- Anlage}}$ An Anlage abgegebene Nutzenergie des Ölheizkessel
 $B_{\text{Öl}}$ Ölverbrauch der Heizkesselanlage in ltr
 H_u Heizwert von Erdöl (10.08 kWh pro ltr)

Berechnet werden die Nutzungsgrade pro Auswertungsperiode. Für die Berechnung des Energieverbrauchs der Vergleichsanlage wird der Mittelwert beider Jahre verwendet.

Im Nutzungsgrad des Heizkessels sind neben den vom Kaminfeuer gemessenen Abgasverlusten (6.4% Teillast, 8.4% Vollast) noch die Abstrahlungs- und Stillstandsverluste erfasst.

3.3 Kostenvergleich zu konventioneller Vergleichsanlage

In diesem Kapitel werden die Investitionen und die Betriebskosten der Wärmepumpenanlage mit denjenigen einer konventionellen Ölheizung verglichen. Folgende Kosten werden ermittelt:

1. Die in Gerzensee getätigten Investitionen
2. Kostenschätzung, wenn anstelle der Wärmepumpe eine Ölheizung installiert worden wäre.
3. Spezifische Energiekosten in Fr. pro kWh Nutzenergie für die Wärmepumpenanlage
4. Spezifischer Energiepreis in Fr. pro kWh für die Ölheizungsanlage.

3.3.1 Systemgrenzen

Bei den in Gerzensee durchgeführten Arbeiten handelte es sich um die Sanierung einer veralteten Wärmeerzeugung. Viele der angefallenen Kosten sind daher anlagen spezifisch und haben keinen allgemeingültigen Wert. Andere Investitionen wie das Erstellen von Räumen für die Energiezentrale und für Wärmeverteilungen etc. mussten nicht getätigkt werden.

Um die Kostenstruktur nicht durch ungenaue Schätzpreise zu verfälschen, sind folgende Systemgrenzen gesetzt worden:

1. Die Kostenstruktur der Sanierung wird beibehalten:
 - Demontage der alten Teile werden einberechnet
 - Keine Kosten für das Erstellen von Raum für Energiezentralen
 - Keine Kosten für Wärmeverteilungen
 - Keine Kosten für übernommene Anlageteile wie Speicher, Fernleitungspumpen, Boiler etc.
2. Bei der Anlage in Gerzensee handelt es sich um eine bivalente Anlage:
 - Kosten für neuen Ölheizkessel werden eingerechnet
3. Einbezug der Kühlung des Mehrzwecksaales
 - Die Kosten der Free-Qooling-Anlage für den Mehrzwecksaal werden berücksichtigt.
 - Für die Vergleichsanlage wird die Installation eines Kaltwassersatzes in der Energiezentrale sowie der Aufbau einer Kälteversorgung bis in die Lüftungszentrale im Dachgeschoß des Schlossgutes berechnet.
4. Beschränkung auf Kosten für die Wärme- und die Kälteerzeugung

Folgende Kosten werden nicht gerechnet:

- Die neuen Regulierung für die Unterstationen im Schlossgut und im Unterkunftsgebäude.
- Die Änderung der Boilerverrohrung im Unterkunftsgebäude.

3.3.2 Investitionskosten

3.3.2.1 Wärmepumpenanlage

In dieser Kostenzusammenstellung werden die effektiv in Gerzensee getätigten Investitionen aufgezeigt. Diese Aufstellung gibt auch die Größenordnung der notwendigen Investitionen für Grosswärmepumpen wieder, mit der Bauherren rechnen müssen.

In den Preisen sind neben den HLK – Installationen auch folgende Kosten inbegriffen:

- Planung der Anlage
- Koordination mit anderen Handwerkern
- Bauleitung
- Kosten für Baumeisterarbeiten
- Kosten für elektrische Verdrahtungen

3.3.2.2 Konventionelle Vergleichsanlage

Für die Ermittlung der Kosten der Vergleichsanlage sind folgende Annahmen getroffen worden:

1. Die alten Luft- Wasserwärmepumpen inkl. Speicher und Hydraulik werden ersatzlos demontiert.
2. Ein neuer Ölheizkessel mit 300 kW Leistung wird installiert.
3. Das bestehende Öltankvolumen mit 19'200 ltr ist für den neuen Ölverbrauch von 78'000 ltr zu klein und muss durch einen neuen Tank mit ca. 65'000 ltr Nenninhalt ergänzt werden.
4. Die Steuerung der Anlage wird auf ein Leitsystem umgebaut.
5. Für die Kühlung des Mehrzwecksaales wird in der Energiezentrale ein luftgekühlter Kaltwassersatz mit ca. 30 kW Leistung installiert.
6. Die Investitionen für die Kältefernleitung inkl. Kühlbatterie und DDC- Regelung für die Lüftungsanlage Mehrzwecksaal müssen ebenfalls getätigten werden.

3.3.3 Kosten pro kWh Nutzwärme

Wie viel kostet ein kWh Nutzenergie mit der Wärmepumpe oder mit der Vergleichsanlage? Der spezifische Energiepreis wird wie folgt berechnet:

$$K_{\text{kWh}} = \frac{K_{\text{Betrieb}}}{QN_{\text{BW Lüftung 1+2}} + QN_{\text{Heizung 1+2}} + Q_0 \text{ MZS}} \quad [\text{Gl. 14}]$$

K_{kWh} Kosten pro kWh bezogener Nutzenergie
 K_{Betrieb} Betriebskosten der Anlage bestehend aus:
 - Energiekosten für Strom und Öl
 - Kapitalkosten
 - Unterhalts- und Servicekosten

$QN_{\text{BW Lüftung 1+2}}$ Nutzenergieverbrauch für Warmwasser und Lüftungsanlagen. Mittelwert der beiden Auswertungsperioden.

$QN_{\text{Heizung 1+2}}$ Nutzenergieverbrauch für Raumheizung. Mittelwert der beiden Messjahre
 $Q_0 \text{ MZS}$ Kühlenergie für den Mehrzwecksaal im Schlossgut. Die Free-Qooling-Anlage war im ersten Messjahr nur kurz in Betrieb. Daher wird der Verbrauch des

zweiten Jahres eingesetzt.

Die Berechnung der Betriebskosten wird nach der Annuitätenmethode durchgeführt. Für Energiepreise sowie Zinssätze werden Marktpreise für November 2005 eingesetzt.

3.4 Betriebliche Erfahrungen mit der Anlage

In diesem Kapitel werden folgende Punkte näher untersucht:

1. Die Betriebsstörungen während der Auswertungsperiode werden aufgelistet und untersucht.
2. Wie verhält sich die Anlage bei verschiedenen Betriebszuständen wie Warmwasser- aufbereitung im Sommer oder Kälteperioden im Winter.
3. Unterhaltskosten der Anlage. Welche Wartungen sind notwendig oder durch den Gesetzgeber vorgeschrieben? Welche Versicherungen sollten für die Anlagen abgeschlossen werden?
4. Bedienaufwand für die Wärmepumpenanlage.
5. Lärmemissionen und Rückschlüsse auf die Planung von Grosswärmepumpen.

3.5 Planerische Aspekte

In diesem Kapitel wird neben allgemeinen Grundsätzen bei der Projektierung von Erdwärmesonden speziell auf die Planung von Grosswärmepumpen und auf spezifische Erfahrungen bei der Ausführung der Anlage in Gerzensee eingegangen. Die Projektierungsgrundlagen werden überprüft. Speziell wird das Temperaturniveau im Erdsondenfeld beim Wärmeeintrag im Sommer und bei Kälteperioden im Winter untersucht. Die Wahl des Kältemittels R134a wird hinterfragt und die Auswirkungen bezüglich Anlauf- und Betriebsströme der Anlage untersucht.

3.5.1 Erdwärmesondenfeld

In diesem Kapitel wird die Planung des Erdsondenfeldes mit den wichtigsten Auslegungsgrößen rekapituliert. Die aufgeführten Werte sind Stand der Technik. In der Praxis werden diese jedoch im harten Wettbewerb häufig vergessen.

Die hohe Messdichte von einer Auslesung alle 5 Minuten über das DDC- System wird benutzt, um das Temperaturniveau beim Wärmeentzug- bzw. Wärmeeintrag in das Sondenfeld zu untersuchen. Die Planungsgrundlagen wie maximale spezifische Entzugsleistung pro m Sonde und die maximale pro Jahr entzogene Wärmemenge in kWh/m werden kontrolliert.

3.5.1.1 Planung von Erdsondenanlagen

Die Planung der Sondenanlage in Gerzensee basierte auf der SIA Dokumentation D 0136 "Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme". Die wichtigsten Punkte aus dem Kapitel über die Erdwärmesonden, die bei der Planung unbedingt beachtet werden sollten, sind in diesem Bericht kurz zusammengefasst worden.

3.5.1.2 Kontrolle der Planungsdaten in Gerzensee

Ein Unsicherheitsfaktor bei der Planung von Erdsondenanlagen ist die fehlende Kenntnis der Bodenbeschaffenheit an der Bohrstelle. In grösseren Sondenfeldern kommt zudem erschwerend hinzu, dass innerhalb des Feldes unterschiedliche geologische Verhältnisse und Grundwasservorkommen herrschen können.

Die bei der Planung der Anlage in Gerzensee getroffenen Annahmen werden mit den effektiven Werten verglichen. Folgende Grössen werden kontrolliert:

1. Nutzenergieverbrauch
2. Maximale Erzeugerleistung Wärmepumpe, Ölheizkessel
3. Maximale Leistung am Verdampfer der beiden Wärmepumpen
4. Bodenbeschaffenheit
5. Relative Sondenbelastung q_{spez} in W/m
6. Wärmeentzug pro m Sonde und Jahr in kWh/ma

3.5.1.3 Temperaturniveau in den Erdsonden

Folgende Fragestellungen sollen in diesem Kapitel beantwortet werden:

1. Mit welchen Erdsondenterperaturen kann im Sommer für die Kühlung gerechnet werden?
 2. Temperaturniveau der Sonden im Winter. Veränderungen zum Sommer. Kurzfristige Temperaturschwankungen im Solekreislauf.
 3. Hatte der Wärmeeintrag im Sommer Einfluss auf die Soletemperaturen im Winter?
- 1. Jahresverlauf der Erdsondenterperaturen für die Messjahre 1 + 2**
- T1 Monatsmittelwerte Vorlauftemperatur vom Sondenfeld
 T2 Monatsmittelwerte Rücklauftemperatur zum Sondenfeld
 T5 Monatsmittelwerte der Aussentemperatur
- Auswertung:
- Temperaturdifferenz zwischen Sommer- und Winterbetrieb.
 - Hatte der Wärmeeintrag im zweiten Jahr Einfluss auf die Soletemperaturen im Winter?
 - Konnte sich die Soletemperatur im Sommer erholen?
- 2. Darstellung des Kühlbetriebs anhand des Temperaturverlaufes für den 21. Juli 2004**
- T1 Mittelwerte pro Stunde der Vorlauftemperatur vom Sondenfeld
 T2 Mittelwerte pro Stunde der Rücklauftemperatur zum Sondenfeld
 T5 Mittelwerte pro Stunde der Aussentemperatur
 $q_{\text{spez.}}$ Maximaler spezifischer Wärmeeintrag pro m Sonde in W/m
 $Q_{0 \text{ MZS}}$ Maximale Kühlleistung in kW.
- Auswertung:
- Kontrolle der Auslegungstemperaturen 16/20°C des Kühlregisters
 - Anstieg der Soletemperaturen während des Sommers
 - Veränderung der Soletemperaturen während des Kühlbetriebs
- 3. Verhalten der Soletemperaturen bei kalter Witterung.**
- Wie reagieren die Soletemperaturen auf grosse Entzugsleistungen bei kalten Temperaturen? Für den 16.12.04 werden folgende Werte dargestellt:
- Q_{hWP} Heizleistung der Wärmepumpen in kW
 $Q_{0\text{WP}}$ Kälteleistung der Wärmepumpen in kW
 T1 Mittelwerte pro Stunde der Vorlauftemperatur vom Sondenfeld
 T2 Mittelwerte pro Stunde der Rücklauftemperatur zum Sondenfeld
- Auswertung:
- Kurzfristige Temperaturschwankungen im Solekreislauf während Leistungsspitzen
 - Erholung der Erdsondenterperaturen kurz und mittelfristig.

3.5.2 Planung von Grosswärmepumpenanlagen

In diesem Kapitel wird dargestellt, auf was bei der Planung von grossen Wärmepumpenanlagen geachtet werden sollte. Folgende Punkte werden behandelt:

1. Bewilligungsverfahren, Abklärungen
2. Elektrische Anschlussdaten
3. Bauliche Massnahmen
4. Hydraulische und Regeltechnische Vorkehrungen
5. Besonderheiten bei der Installation der Anlage

3.5.3 Wahl des Kältemittels R134a

In Gerzensee wurde in den Wärmepumpen das Kältemittel R134a verwendet. Diese Wahl wird in diesem Kapitel hinterfragt. Folgende Punkte werden behandelt:

1. Welche Kältemittel werden heute in der Wärmepumpeentechnik verwendet?
2. Eigenschaften der verschiedenen Kältemittel
3. Warum wurde R134a in Gerzensee eingesetzt?
4. Anlauf- und Betriebsströme von R134a.

4. Hauptergebnisse

In diesem Teil des Schlussberichts werden die wichtigsten Ergebnisse der Messungen und Auswertungen zusammengefasst. Grundlage sind die Ausführungen in Kapitel 3.

4.1 Nachweis der Energieeffizienz

4.1.1 Überschlagsrechnung der Energieeinsparung

Wie viel Endenergie konnte gegenüber der alten Anlage mit den Luft- Wasserwärmepumpen und im Vergleich zu einer Ölheizungsanlage eingespart werden? Anhand der Stromrechnungen der BKW- Energie AG und des auf der Anlage gemessenen Nutzenergie- sowie Ölverbrauchs wird die Einsparung an Endenergie sowie der Anlagennutzungsgrad berechnet.

Tabelle 4: Berechnung der Einsparung an Endenergie

	Bestehende Anlage	WP Jahr 1	WP Jahr 2	Vergleichsanlage	
Nutzenergie					
BW/ Lüftung	158'091 kWh	146'630 kWh	169'551 kWh	158'091 kWh	1)
Raumheizung	497'450 kWh	492'609 kWh	502'609 kWh	497'450 kWh	2)
Kühlung MZS	0 kWh	79 kWh	991 kWh	991 kWh	3)
Total Nutzenergie	655'541 kWh	639'318 kWh	672'832 kWh	656'532 kWh	
Endenergie					
Ölverbrauch	34'800 ltr/a	6'000 ltr/a	7'629 ltr/a	77'976 ltr/a	4)
Input Ölheizung	350'784 kWh	60'487 kWh	76'900 kWh	786'020 kWh	5)
Stromverbrauch	211'000 kWh	218'525 kWh	217'529 kWh	38'700 kWh	6)
Kühlung MZS	0 kWh	100 kWh	100 kWh	383 kWh	7)
Total Endenergie	561'784 kWh	279'112 kWh	294'529 kWh	825'103 kWh	
Vergleich	100%	49.7%	52.4%	146.9%	
Nutzungsgrad	1.17	2.29	2.28	0.80	8)

- 1) Nutzenergieverbrauch für Brauchwasserbereitung und für die Lüftungsanlagen gemäss Wärmezähler Q4. Für die alte Wärmepumpenanlage und für die Vergleichsanlage wurden Mittelwerte der beiden Messjahre eingesetzt.
- 2) Nutzenergieverbrauch für die Raumheizung gemäss Wärmezähler Q5. Mittelwerte der beiden Messjahre für die bestehende Anlage und die Ölheizung.
- 3) Nutzenergieverbrauch für die Kühlung des Mehrzwecksaales gemäss Wärmezähler Q8:
 - Bestehende Anlage: Keine Kühlung installiert
 - Messjahr 1: Inbetriebnahme der Free-Qooling-Anlage Ende August nach der Hitzeperiode.
 - Messjahr 2: Kühlernergie für Sommer 2004.
- 4) Ölverbrauchszahlen:
 - Bestehende Anlagen: Angaben aus alten Energiestatistiken
 - Messjahr 1+2: Gemäss Ölzähler B1
 - Vergleichsanlage: Gemäss Berechnung Kapitel 3.2.1.3
- 5) Energieinput der Ölheizungsanlage gemäss Berechnung Kapitel 3.2.1.3
- 6) Stromverbrauchszahlen:
 - Bestehende Anlage: Angaben aus alten Energiestatistiken
 - Messjahr 1+2 gemäss Aufstellung Kapitel 3.2.1.2
 - Vergleichsanlage: Pumpenstrom gemäss Berechnung Kapitel 3.2.1.3

- 7) Elektrische Energie für die fiktive Kältemaschine der Vergleichsanlage gemäss Berechnung Kapitel 3.2.1.3
- 8) Jahresnutzungsgrad der Anlagen gemäss Berechnung Kapitel 3.2.1.4. Für die Messjahre 1+2 sowie für die Vergleichsanlage ist die Kühlung des Mehrzwecksaales im Nutzungsgrad einberechnet.

4.1.2 Kontrolle einzelner Anlageteile

4.1.2.1 COP- Werte der Wärmepumpen

Die Berechnung und Auswertung der Messdaten erfolgte gemäss Beschrieb im Kapitel 3.2.2.1.

1. COP- Tagesmittelwerte

In untenstehenden Diagrammen sind die COP- Werte für Wärmepumpen 1+2 in Funktion der Kondensatoraustrittstemperaturen für die Jahre 1 + 2 dargestellt. Die Werte beziehen sich auf folgende Soletemperaturen:

		Jahr 1	Jahr 2
Eintrittstemperatur	Mittelwert	8.56°C	8.17°C
	Maximalwert	10.98°C	10.57°C
	Minimalwert	6.42°C	5.66°C
Austrittstemperatur	Mittelwert	6.99°C	6.82°C
	Maximalwert	9.35°C	10.03°C
	Minimalwert	4.78°C	3.98°C

Die Maximal- und Minimaltemperaturen sind Mittelwerte pro Stunde aus den jeweiligen Messjahren.

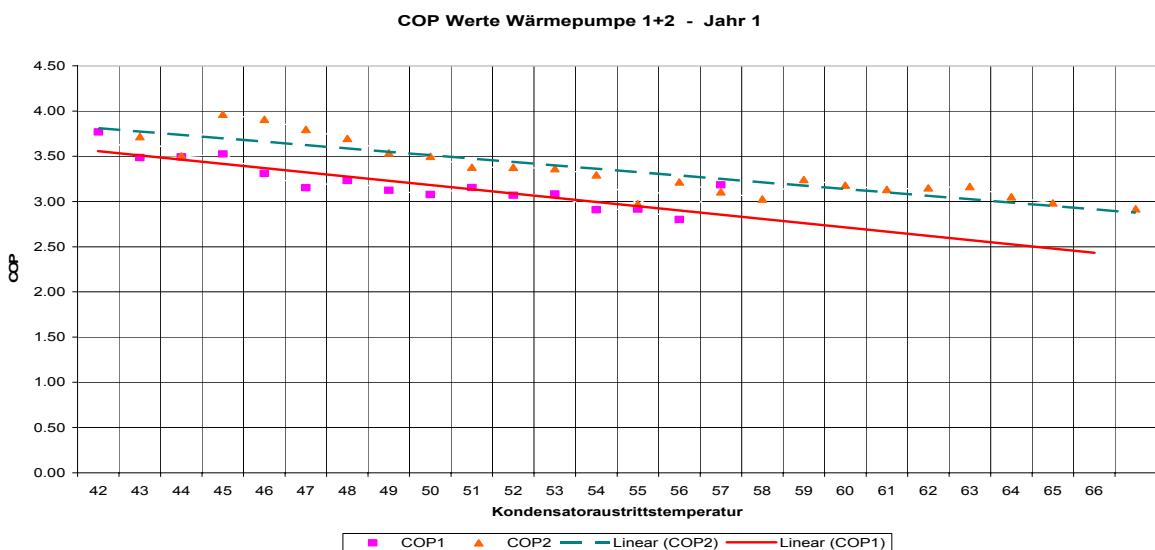


Bild 10: COP- Werte Wärmepumpe 1 + 2 für Auswertungsjahr 1

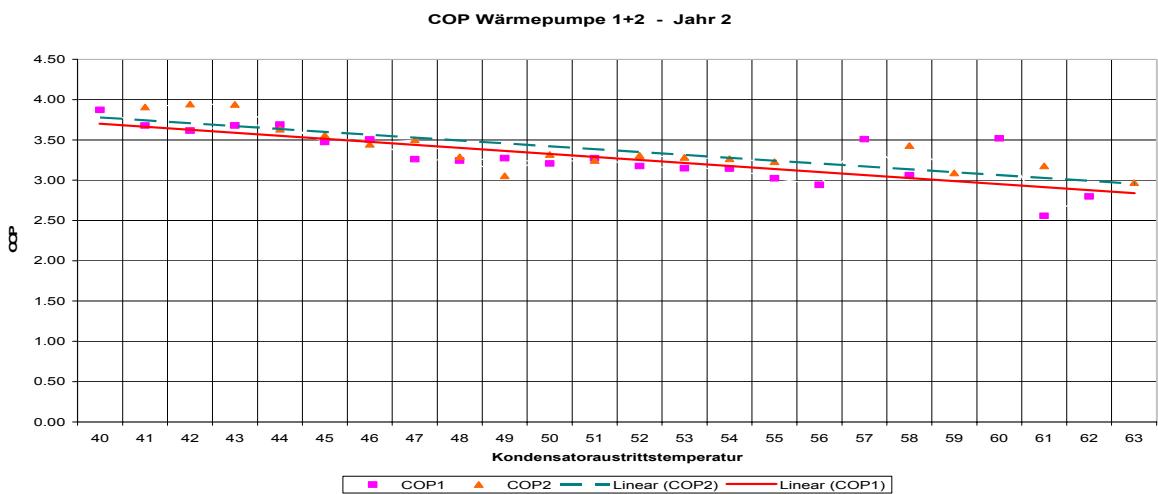


Bild 11: COP- Werte Wärmepumpe 1 + 2 für Auswertungsjahr 2

2. COP- Monatsmittelwerte

In untenstehender Tabelle sind die COP- Werte pro Monat dargestellt. Diese wurden anhand der Formeln in Kapitel 3.2.2.1 mit den Zählerständen zu Beginn und am Ende des jeweiligen Monats berechnet.

Tabelle 5: COP –Monatswerte

Monat	Soletemp.	Wärmepumpe 1		Wärmepumpe 2	
		T1	COP _{WP1}	T3	COP _{WP2}
Jahr 1					
April 03	8.67°C		3.54	42.47°C	3.70
Mai 03	9.46°C		3.41	45.16°C	3.44
Juni 03	8.66°C	1)		1)	3.05
Juli 03	10.98°C	1)		1)	3.30
August 03	10.57°C		3.38	36.87°C	3.14
September 03	10.78°C		3.47	44.23°C	3.46
Oktober 03	9.14°C		3.28	39.63°C	3.82
November 03	7.95°C		3.30	46.26°C	3.78
Dezember 03	6.90°C		3.16	49.58°C	3.55
Januar 04	6.69°C		3.10	49.40°C	3.55
Februar 04	6.42°C		3.16	50.65°C	3.53
März 04	6.53°C		3.34	48.80°C	3.43
Jahr 2					
April 04	7.63°C		3.70	48.88°C	3.95
Mai 04	8.63°C		3.54	47.78°C	2)
Juni 04	9.30°C	1)		1)	3.80
Juli 04	10.57°C		3.41	48.64°C	2)
August 04	10.52°C		3.55	44.06°C	2)
September 04	9.89°C		3.29	42.87°C	3.72
Oktober 04	9.12°C		3.68	46.11°C	3.85
November 04	7.54°C		3.47	47.81°C	3.56
Dezember 04	6.50°C		3.31	49.89°C	3.40
Januar 05	6.21°C		3.23	49.92°C	3.37
Februar 05	5.66°C		3.18	50.06°C	3.32
März 05	6.50°C		3.37	48.43°C	3.51
					46.83°C

Legende:

- T1 Monatsmittelwert Verdampfereintrittstemperatur Wärmepumpe 1+2
 T3 Monatsmittelwert Kondensatoraustrittstemperatur Wärmepumpe 1
 COP_{WP1} COP – Wert pro Monat für Wärmepumpe 1
 T4 Monatsmittelwert Kondensatoraustrittstemperatur Wärmepumpe 2
 COP_{WP2} COP – Wert pro Monat für Wärmepumpe 2
 1) Nur sporadische oder gar keine Laufzeiten für Wärmepumpe 1
 2) Nur sporadische oder gar keine Laufzeiten für Wärmepumpe 2

3. COP- Jahresmittelwerte; Arbeitszahl der Wärmepumpen

COP – Werte und Arbeitszahlen pro Auswertungsjahr berechnet gemäss Beschrieb in Kapitel 3.2.2.1 mit den Zählerständen am 1. April und 31. März des jeweiligen Auswertungsjahres.

Tabelle 6: COP- Jahreswerte; Arbeitszahlen der Wärmepumpen

Jahr	Wärmepumpe 1			Wärmepumpe 2		
	COP- Jahresmittelwerte			COP- Jahresmittelwerte		
	Q _{WP1}	E _{WP1}	COP _{WP1}	Q _{WP2}	E _{WP2}	COP _{WP2}
Jahr 1	275'430 kWh	84'869 kWh	3.25	290'540 kWh	82'324 kWh	3.53
Jahr 2	290'900 kWh	86'131 kWh	3.38	266'750 kWh	75'412 kWh	3.54
	mittlere Arbeitszahl Jahr 1+2			mittlere Arbeitszahl Jahr 1+2		
	Q _{WP1 (1+2)}	E _{WP1 (1+2)}	β _{J WP1}	Q _{WP2 (1+2)}	E _{WP2 (1+2)}	β _{J WP2}
Jahr 1+2	283'165 kWh	85'500 kWh		278'645 kWh	78'868 kWh	
E _{Pu WP}		10'850 kWh			10'850 kWh	
Total	283'165 kWh	96'350 kWh	2.94	278'645 kWh	89'718 kWh	3.10

Legende:

- Q_{WP1} Nutzwärmeabgabe der Wärmepumpe 1 gemäss Zähler Q1 im Kondensatorkreis
 E_{WP1} Stromverbrauch Wärmepumpe 1 gemäss Elektrozähler in der Kraftzuleitung
 COP_{WP1} COP- Wert Wärmepumpe 1 pro Auswertungsjahr
 Q_{WP2} Nutzwärmeabgabe der Wärmepumpe 2 gemäss Zähler Q2 im Kondensatorkreis
 E_{WP2} Stromverbrauch Wärmepumpe 2 gemäss Elektrozähler in der Kraftzuleitung
 COP_{WP2} COP- Wert Wärmepumpe 2 pro Auswertungsjahr
 Q_{WP1 (1+2)} Mittelwert der Nutzwärmeabgabe für WP1 der beiden Messjahre
 E_{WP1 (1+2)} Mittelwert des Stromverbrauchs für WP1 der beiden Messjahre
 β_{J WP1} Jahresarbeitszahl für Wärmepumpe 1
 Q_{WP2 (1+2)} Mittelwert der Nutzwärmeabgabe für WP2 der beiden Messjahre
 E_{WP2 (1+2)} Mittelwert des Stromverbrauchs für WP2 der beiden Messjahre
 β_{J WP2} Jahresarbeitszahl für Wärmepumpe 2
 E_{Pu WP} Stromverbrauch der Sole- und Kondensatorpumpen

4.1.2.2 Deckungsgrad der Wärmepumpen

Unter dem Deckungsgrad der Wärmepumpen wird nach Beschrieb in Kapitel 3.2.2.2 der Anteil der Wärmepumpen an der gesamten Wärmeproduktion der Anlage verstanden. Ein Ziel der Bauherrschaft bei der Sanierung war eine möglichst grosse Steigerung des Wärmepumpenanteils. Dieser betrug bei der alten Luft- Wasserwärmepumpenanlage 50.6%.

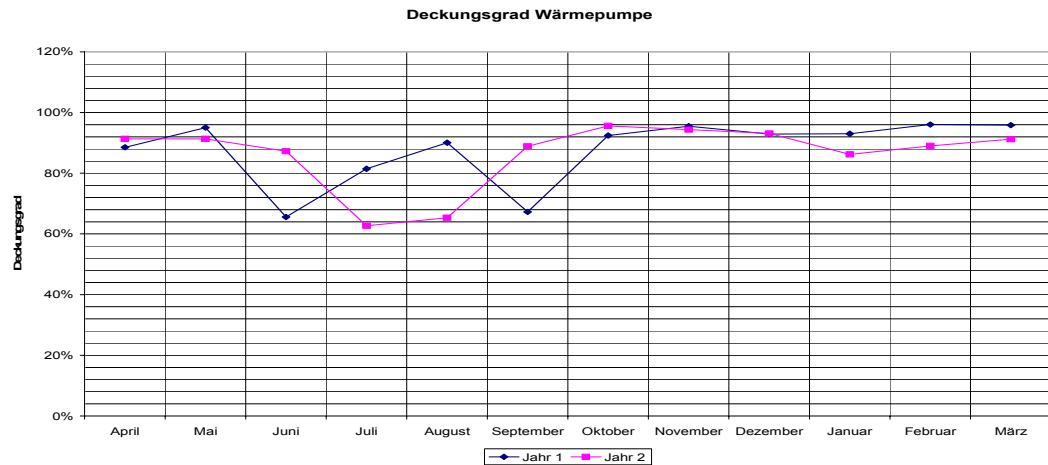


Bild 12: Jahresverlauf der Wärmepumpendeckungsgrade

Deckungsgrad Jahr 1	92.01%
Deckungsgrad Jahr 2	89.45%

Der im Zwischenbericht angestrebte Deckungsgrad von 95% konnte nicht ganz erreicht werden. Vor allem im Sommer und während Kälteperioden war der Anteil der Wärmepumpe unter 90%.

- Im Sommer kam der Ölheizkessel wegen der Legionellenhochladung der Boiler alle Wochen einmal zum Einsatz. Daher sank wegen des niedrigen Gesamtenergieverbrauchs der Deckungsgrad automatisch. Wegen der begrenzten Vorlauftemperaturen und dem ausgedehnten Fernleitungsnetz ist die Warmwasserbereitung mit der Wärmepumpe problematisch.
- Im Winter war der Anteil des Heizkessels vor allem während Kälteperioden hoch. Die Verbrauchsspitzen für Lüftung und Raumheizung betragen bei tiefen Außentemperaturen bis zu 300 kW. Dieser Wert überstieg die Gesamtleistung der Wärmepumpe von 240 kW. Die Ergänzungsleistung war notwendig.

4.1.2.3 Nutzungsgrad des Ölheizkessels

Dieser Wert dient nur zur Bestimmung des Energieverbrauchs der Vergleichsanlage. Die Bestimmung erfolgt nach der Formel in Kapitel 3.2.2.3.

	Jahr 1	Jahr 2
Nutzenergie Ölheizkessel	49'160 kWh	65'740 kWh
Ölverbrauch	6000.7 ltr	7'629.0 ltr
Energieinput Ölheizung	60'487 kWh	76'900 kWh
Nutzungsgrad	81.3%	85.5%

Mittelwert beider Jahre 83.4%

4.2 Kostenvergleich zu konventioneller Vergleichsanlage

Die in Gerzensee getätigten Investitionen werden mit denjenigen einer Sanierung der Wärmeerzeugung mit einem Ölheizkessel verglichen. Der Vergleich beruht auf den im Kapitel 3.3.1 aufgestellten Systemgrenzen sowie den Bemerkungen in Kapitel 3.3.2.

4.2.1 Investitionskosten

Gerechnet wurden folgende Arbeiten:

1. Erdsondenwärmepumpe

- Demontage der alten Luft- Wasserwärmepumpen.
- Erdsondenanlage mit total 4'765 m Länge, Sondenverteiler in 2 Schächten, Anschlussleitungen bis Zentrale, Hydraulik in Zentrale, Glykolfüllung, Isolierung.
- 2 Wärmepumpen mit je 114 kW Leistung (B0W50).
- Hydraulischer Anschluss auf bestehende Wärmespeicher. Neue Serieverrohrung für Speicher.
- Leitsystem für Energiezentrale. Neue Schaltschränke.
- Neuer Ölheizkessel 300 kW mit Kaminsanierung, Ölversorgung. Hydraulischer Anschluss Ölheizkessel an bestehende Anlage.
- Free- Qoolinganlage für Mehrzwecksaal mit Gruppe in Sondenanlage, Fernleitung, Luftkühler in Lüftungsanlage, DDC- Regelung inkl. Schaltschrank.
- Bauseitige Nebenkosten:
 - Elektriker: - Neue Kraft einspeisung Zentrale ab Unterstation BKW
- Blindstromkompensationsanlage
- Provisorische Stromversorgung Studienzentrum
- Verdrahtung der Anlage in Zentrale und Lüftungszentrale Schlossgut
 - Baumeister - Entfernen Humus beim Sondenterrain
- 2 Schächte für Sondenverteiler
- Grabarbeiten
- Arbeiten in Zentrale wie Sockel, diverse Maurerarbeiten
- Wiederherstellungsarbeiten Sondenfeld
- Grabarbeiten für Free- Qoolingleitung, Kernbohrungen
 - Bohrschlammensorgung

2. Ölheizungsanlage

- Demontage der alten Luft- Wasserwärmepumpen mit Wärmepumpenspeicher
- Neue, platzgeschweisste Öltankanlage mit 65 m³ Nutzinhalt
- Neuer Ölheizkessel 300 kW mit Kaminsanierung, Ölversorgung. Hydraulischer Anschluss Ölheizkessel an bestehende Anlage.
- Leitsystem für Energiezentrale. Neue Schaltschränke.
- Kälteanlage für Mehrzwecksaal bestehend aus:
 - Kaltwassersatz luftgekühlt mit 30 kW Leistung
 - Hydraulik in Zentrale mit Pufferspeicher 1'000 ltr
 - Fernleitung zum Schlossgut
 - Luftkühler in Lüftungsanlage
 - DDC- Regelung inkl. Schaltschrank.
- Bauseitige Arbeiten
 - Elektriker - Verdrahten Kaltwassersatz und Ölheizkessel
- Verdrahten Lüftungsanlage Mehrzwecksaal
 - Baumeister - Trennwände für neuen Öltank
- Grabarbeiten für Kälteleitung, Kernbohrungen

Die Kosten verstehen sich netto inkl. 7.6% MWSt. Sämtliche Ingenieurkosten sind in den Preisen eingerechnet.

Tabelle 7: Investitionskosten der Wärmepumpen- und Vergleichsanlage

BKP	Position	Wärmepumpenanlage	Ölheizung
	HLK- Installationen		
	Vorbereitungsarbeiten		
240.1	Aussbetriebnahme, Kältemittelleitung	5'300.--	5'300.--
240.2	Demontage Luft/Wasser WP	15'100.--	15'100.--
240.3	Demontage WP-Speicher		4'600.--
240.4	Demontage Ölheizkessel	2400.--	22'800.--
			2'400.--
			27'400.--
	Wärmegewinnung, Energielagerung		
241.1	4'765 m Erdsonden	333'500.--	
241.2	Sondenverteiler, Anschlussleitungen	65'500.--	
241.3	Sondenanlage Zentrale, Glykolfüllung	98'400.--	
241.4	Platzgeschweisster Öltank 65000 ltr		38'000.--
241.5	Ölversorgung auf Brenner		5'000.--
241.6	Anpassungen an Kaminanlage	7'600.--	505'000.--
		7'600.--	50'600.--
	Wärmeerzeugung		
242.1	2 Wärmepumpen à 114 kW (B0W50)	192'000.--	
242.2	Hydraulik für Wärmepumpen	60'400.--	
242.3	Ölheizkessel 300 kW	27'500.--	27'500.--
242.4	Hydraulik Ölheizkessel	6'100.--	286'000.--
		6'100.--	33'600.--
	DDC- Regulierung		
242.5	Leitsystem für Energiezentrale	56'600.--	56'600.--
		33'500.--	33'500.--
	Free-Qooling-Anlage		
246.1	Luftgekühlter Kaltwassersatz 30 kW		31'300.--
246.2	Hydraulik, Speicher zu Kaltwassersatz		16'800.--
246.3	Kälteleitung Zentrale – Schlossgut	59'200.--	59'200.--
246.4	Luftkühler Lüftungsanlage MZS	12'500.--	12500.--
246.5	Leitsystem Lüftung Mehrzwecksaal	23'100.--	94'800.--
		23'100.--	142'900.--
	Total HLK – Installationen	965'200.--	288'000.--
	Bauseitige Nebenkosten		
	Elektrische Verdrahtungsarbeiten	69'500.--	7'600.--
	Bohrschlammentsorgung Erdsonden	35'600.--	
	Baumeisterarbeiten	56'900.--	20'000.--
	Nebenkosten für Kälteanlage	15'500.--	24'500.--
	Total Nebenkosten	177'500.--	52'100.--
	Total Investitionskosten	1'142'700.--	340'100.--

4.2.2 Spezifische Energiepreise in Fr./ kWh

Die Kosten pro kWh Nutzwärme werden nach der Annuitätenmethode berechnet. Die Berechnung wurde gemäss den Grundlagen in Kapitel 3.3.3 ausgeführt. Gerechnet wird mit dem Kostenniveau vom November 2005.

Tabelle 8: Berechnung des spezifischen Energiepreises

Position		Wärmepumpenanlage	Ölheizungsanlage		
Energiekosten					
Strom Wärmepumpenanlage					
Sommer HT 27'828 kWh	0.11	3'061.--			
Sommer NT 23'142 kWh	0.07	1'620.--			
Winter HT 110'856 kWh	0.14	15'520.--			
Winter NT 56'451 kWh	0.095	5'363.--			
Abonnement Zähler 12 Monate	8.50	102.--	25'666.--		
Strom Vergleichsanlage Pumpen, Kältemaschine etc.					
Verbrauch 38'700 kWh	0.157				6'076.--
Kosten für Heizöl					
Wärmepumpe 6'815 ltr/a	75.--		5'111.--		
Vergleichsanlage 77'976 ltr/a	75.--				58'482.--
Total Kosten für Energie			30'777.--		64'558.--
Kapitalkosten					
Vorbereitungsarbeiten	8.68%	22'800.--	1'979.--	27'400.--	2'378.--
Erdsonden, Verteiler	5.44%	399'000.--	21'706.--		
Sondenanlage in Zentrale	7.04%	98'400.--	6'927.--		
Öltank	5.44%			38'000.--	2'067.--
Ölversorgung auf Brenner	8.68%			5'000.--	434.--
Kaminanlage	8.68%	7'600.--	660.--	7'600.--	660.--
Wärmepumpen	8.68%	192'000.--	16'666.--		
Hydraulik Wärmepumpen	7.04%	60'400.--	4'252.--		
Ölheizkessel	8.68%	27'500.--	2'387.--	27'500.--	2'387.--
Hydraulik Ölheizkessel	7.04%	6'100.--	429.--	6'100.--	429.--
DDC-Regulierung	8.68%	56'600.--	4'913.--	33'500.--	2'908.--
Kaltwassersatz	8.68%			31'300.--	2'717.--
Hydraulik Kaltwassersatz	7.04%			16'800.--	1'183.--
Fernleitung Kälte Schlossgut	6.07%	59'200.--	3'593.--	59'200.--	3'593.--
Lüftkühler MZS	7.04%	12'500.--	880.--	12'500.--	880.--
DDC Lüftung MZS	8.68%	23'100.--	2'005.--	23'100.--	2'005.--
Elektrische Verdrahtungen	8.68%	69'500.--	6'033.--	7'600.--	660.--
Bohrschlammentsorgung	5.44%	35'600.--	1'937.--		
Baumeisterarbeiten	5.44%	56'900.--	3'095.--	20'000.--	1'088.--
Nebenkosten Kälteanlage	8.68%	15'500.--	1'345.--	24'500.--	2'127.--
Total Kapitalkosten		1'142'700.--	78'807.--	340'100.--	25'516.--
Unterhaltskosten					
Wartungsabo Wärmepumpe			3'153.--		
Wartungsabo Ölheizkessel			671.--		671.--
Kaminfeger			406.--		406.--
Versicherungen			1'616.--		272.--
Öltankrevisionen			200.--		600.--

Sonstiger Unterhalt (1% der Zentraleninstalation)		543'400.--	5'434.--	260'600.--	2'606.--
Total Unterhaltskosten			11'480.--		4'555.--
Spezifischer Energiepreis					
Energiekosten			30'777.--		64'558.--
Kapitalkosten			78'807.--		25'516.--
Unterhaltskosten			11'480.--		4'555.--
Total Jahreskosten der Anlage			121'064.--		94'629.--
Nutzwärmeproduktion	(kWh)	656'532		656'532	
Spezifischer Energiepreis	(Rp./kWh)		18.4		14.4

Die Berechnung des spezifischen Energiepreises beruht auf folgenden Grundlagen:

1. Energiepreis Strom
 - 1.1 Wärmepumpe Tarif Econom I
 - Sommer HT 11.00 Rp/kWh
 - Sommer NT 7.00 Rp/kWh
 - Winter HT 14.00 Rp/kWh
 - Winter NT 9.50 Rp/kWh
 - Abonnementspreis 8.50 pro Monat
 - 100'000 kWh pro Jahr Ökostrombeitrag water star
(In Vergleichsrechnung nicht berücksichtigt)
 - 1.2 Normalstrom Tarif Modulo classic best. aus:
 - Leistungspreis
 - Energie Hoch- und Niedertarif
 - Blindenergie Hoch- und Niedertarif
 - Mischpreis Studienzentrum 15.7 Rp./kWh
(3. Quartal 03 bis 2. Quartal 05)
2. Energiepreis Öl Fr. 75.— pro 100 ltr
3. Zinssatz 3.5%
4. Lebensdauer Anlageteile

Sondenanlage	30 Jahre	Annuität 5.44%
Wärmepumpe	15 Jahre	Annuität 8.68%
Hydraulik	20 Jahre	Annuität 7.04%
Ölheizkessel	15 Jahre	Annuität 8.68%
Öltankanlage	30 Jahre	Annuität 5.44%
Fernleitungen	25 Jahre	Annuität 6.07%
Kältemaschine	15 Jahre	Annuität 8.68%

4.3 Betriebliche Erfahrungen mit der Anlage

In diesem Kapitel wird auf die Erfahrungen mit der Erdsondenanlage seit der Inbetriebnahme im August 2002 eingegangen.

4.3.1 Störungen seit Inbetriebnahme im August 2002

Die Anlage in Gerzensee funktionierte die meiste Zeit über störungsfrei. Die meisten Probleme traten in der Anfangsphase nach der Inbetriebnahme auf.

1. Probleme im ersten halben Jahr nach der Inbetriebnahme:
 - Öldruckstörungen. Diese wurden durch die Verlagerung von Kälteöl in den beiden parallel geschalteten Kältekreisen verursacht. Nachträglich wurde vom Hersteller eine Ausgleichsleitung zwischen den beiden Verdichtern installiert.
 - Hochdruckstörungen. Diese wurden durch die externe DDC- Regelung verursacht. Gründe waren zu hohe Sollwerte und verspätete Freigaben der Umwälzpumpen im Kondensatorkreis. Diese Probleme konnten durch das Anpassen der Steuerung behoben werden.
2. Probleme ab Januar 2003 bis Sommer 2005:
 - 01.04.05 Öldruckstörung. Das Problem der Verlagerung von Kälteöl konnte auch mit der Ausgleichsleitung nicht ganz behoben werden.

Nach der Startphase der Anlage und dieser Störung am 01.04.05 liefen die Wärmepumpen ohne Probleme.

4.3.2 Verhalten der Anlage bei verschiedenen Betriebszuständen

1. Warmwasserladebetrieb im Sommer

Bei der Warmwasserladung erwies sich die Trägheit der ausgedehnten Anlage als grosses Problem. Vor allem im Sommer, wenn die Fernleitungsnetze kalt waren, kam der Ölheizkessel oft zum Einsatz, was sich in tiefen Wärmepumpendekungsgraden von 63 – 88% für die Sommermonate ausdrückt.

Für die Boilerladung wird ausserhalb der Heizsaison nur eine Wärmepumpe freigegeben. Diese muss das Fernleitungsnetz mit ca. 2'700 ltr Inhalt von 25°C auf 60 – 65°C und danach die total 4'000 ltr Warmwasserverbrauch pro Tag von 10°C auf 55°C aufheizen. Mit den 120 kW Leistung einer Wärmepumpe dauert dies theoretisch 3 Stunden.

Trotz Kondensatoraustrittsregelung, mit der Vorlauftemperaturen von bis zu 67°C an das Fernleitungsnetz abgegeben werden konnten, dauerte es 50 Minuten, bis in der Unterstation für die Unterkünfte eine für die Boilerladung genügende Temperatur erreicht werden konnte. Noch extremer war die Situation im Schlossgut. Obwohl nur die obere Hälfte des riesigen 9'000 ltr Boiler aufgeheizt wurden, dauerte die Boilerladung zu lange. Der Ölheizkessel kam daher fast jeden Tag zum Einsatz, obwohl die Verzögerungszeiten für dessen Freigabe erhöht wurden. Daher wurde im Schlossgut die Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe ausser Betrieb genommen. Das Warmwasser wird dort wie vor der Sanierung durch den Wärmerückgewinnungsboiler der Kühlanlagen auf 40°C vorgewärmt und durch den Elektroboiler auf 63°C nachgeheizt.

2. Kälteperioden im Winter

Die Anlage wurde als bivalent- parallele Wärmepumpenanlage mit einem Ölheizkessel für die Spitzenlast geplant. Der maximale Wärmeverbrauch für die Raumheizung sowie für Warmwasserbereitung und Lüftung wurde anhand der Energieverbrauchszahlen der alten Anlage auf 255 kW geschätzt.

Effektiv betrugen die Leistungsspitzen der Wärmeverbraucher während der beiden Auswertungsjahre 280 – 320 kW. Die Leistungsspitzen traten vor allem während der Aufheizphase am Morgen auf. Diese Periode dauerte in der Regel fünf bis sechs Stunden. Da die Verbraucherleistung die maximale Leistung der Wärmepumpenanlage von 240 kW überstieg, kam der Ölheizkessel während den Kälteperioden häufiger zum Einsatz.

Von Januar bis Anfang März 2005 mit den längeren Kälteperioden mit Außentemperaturen von bis zu -12°C konnte dies häufig beobachtet werden. Die Deckungsgrade der Wärmepumpe von Januar bis März 2005 waren daher um 4 – 7% tiefer als diejenigen der wärmeren Periode Januar bis März 2004.

Diese Leistungsspitzen am Morgen könnten durch einen Verzicht auf die Nachabsenkung oder einer Verschiebung der Absenkenzeiten vermieden werden. Eine gestaffelte Freigabe der Heizgruppen nach der Boilerladung ab 02:00 Uhr würde zudem den Niedertarifanteil am Stromverbrauch erhöhen.

3. Kühlbetrieb im Sommer 2004

Als Gewinn für das Studienzentrum stellte sich die neu installierte Kühlung des Mehrzwecksaales heraus. Dieser konnte im Sommer 2004 für Veranstaltungen benutzt werden, die früher wegen den zu hohen Raumtemperaturen undenkbar gewesen wären.

Wegen des kühlen Sommers 2004 betrug die an den Saal abgegebene Kälteenergie nur 991 kWh. Dies ist im Verhältnis zu den Investitionskosten für die Free- Coolinganlage von Fr. 110'300.— inkl. bauseitigen Nebenarbeiten wenig. Das Erdsondenfeld von 4'765 m Länge hat ein Kältepotential von ca. 96 kW (spezifische Eintragsleistung 20 W/m). Die neue Fernleitung wurde auf diesen Wert dimensioniert, so dass zu einem späteren Zeitpunkt weitere Kälteverbraucher angeschlossen werden können.

4.3.3 Unterhalt der Anlage

Mit Heizungsanlagen verhält es sich gleich wie beim Auto: Um unliebsame Pannen zu vermeiden, muss eine regelmässige Wartung der Anlageteile durchgeführt werden. Daher wird in diesem Kapitel kurz auf den Unterhalt der Anlage eingegangen:

1. Bedienaufwand

Die Anlage funktioniert mit der DDC- Regulierung vollautomatisch. Störungen werden über eine Schnittstelle während 24 Stunden direkt dem technischen Dienst weitergemeldet. Der Aufwand für die Bedienung beschränkt sich daher auf periodische Kontrollgänge mit folgenden Aufgaben:

- Kontrolle des Füllgrades der Expansionsautomaten der Heizungsanlage. Nachspeisen von Wasser nach Bedarf.
- Kontrolle des Anlagedruckes im Erdsondenkreislauf.
- Kontrolle der Solttemperaturen auf plötzliche Veränderungen.
- Kontrolle des Füllgrades in den Öltanks.

2. Wartungskosten

2.1 Wartungsabonnement für Wärmepumpe

Im Gegensatz zu kleineren Wärmepumpen ist der Abschluss eines Wartungsabonnements für die Grosswärmepumpen notwendig. Dies hilft, irreparable Schäden an den Verdichtern zu verhindern und stellt durch die Kontrolle des Kältekreises optimale Arbeitszahlen der Anlage sicher. Die Arbeitszeit für die Behebung von Störungen ist ebenfalls im Wartungspreis inbegriffen. Für die Anlage in Gerzensee wurde mit der Firma CTA daher ein Wartungsvertrag abgeschlossen:

Kosten Wartungsvertrag für beide Wärmepumpen	Fr. 3'153.--
Wartungsperiode	alle 12 Monate
Materialkosten	nicht inbegriffen

2.2 Wartungsabonnement für Ölbrenner

Für Low- NOx Ölbrenner ist eine periodische Wartung ebenfalls unabdingbar.

Kosten Wartungsvertrag für Brenner 300 kW	Fr. 671.--
Wartungsperiode	alle 12 Monate
Materialkosten	nicht inbegriffen

2.3 Gesetzlich vorgeschriebene Unterhaltsarbeiten

Für den Ölheizkessel sind vom Gesetzgeber zusätzliche Wartungen vorgeschrieben:

- Abgasmessungen
- Kaminfegerarbeiten
- Öltankrevisionen

3. Versicherungen

Eine Wärmepumpe besitzt im Kompressor ein im Verhältnis zu den übrigen Komponenten extrem teures Bestandteil. Zudem gilt dieser als elektrisches Bauteil und besitzt nach SIA nur 1 Jahr Garantie.

Kompressorschäden können schon nach relativ kurzer Betriebszeit auftreten. Ein Schaden in der Höhe von weit über Fr. 20'000.— kurz nach Ablauf der Garantiezeit hat schon zu mancher schwerwiegenden Verstimmung zwischen Bauherr, Installateuer (seine Garantiezeit gegenüber dem Bauherrn dauert in der Regel 2 oder sogar 5 Jahre!) und dem Wärmepumpenfabrikant geführt.

Für grössere Wärmepumpen ist daher der Abschluss einer Maschinenbruchversicherung sehr zu empfehlen. In Gerzensee beläuft sich die Prämie für die beiden Maschinen auf 8.7% der Investitionssumme exkl. MWSt. Die Jahresprämie beträgt Fr. 1'616.— exkl. Stempelabgabe.

4.3.4 Lärmemissionen

Der Schallleistungspegel pro Wärmepumpe beträgt 75 dB(A), gemessen in 1m Entfernung ohne Reflexion. Kleinwärmepumpen bis 20 kW Leistung haben zum Vergleich Werte von 48 – 62 dB(A). Die Wärmepumpen in Gerzensee werden in der Zentrale nicht als extrem laut empfunden.

Trotzdem sollte man sich bei einer neuen Wohnüberbauung genau überlegen, wo die Heizzentrale platziert wird. Wenn möglich sollte ein Teil der Einstellhalle, der ausserhalb des bewohnten Baukörpers liegt, als Heizzentrale ausgebildet werden. Räume direkt unterhalb von Wohnungen sollten gemieden werden.

Bei der Aufstellung und beim Anschluss der Wärmepumpe sollte auf folgendes geachtet werden:

- Der Wärmepumpensockel sollte eine möglichst grosse Masse aufweisen. Zudem muss dieser auf einer schalldämmenden Schicht aufliegen. In Gerzensee wurden Stylomer Platten, G25 gelb

mit 25mm Dicke verwendet. Diese muss vom Hersteller auf das Gewicht der Maschine und des Sockels sowie auf die Erregerfrequenz abgestimmt werden.

- In die hydraulischen Anschlüsse an die Erdsonden- und die Heizungsanlage müssen Schwingungsdämpfer eingebaut werden. In heiklen Fällen sind Elemente in die Y- und X- Achse zu montieren. Es ist darauf zu achten, dass zwischen Wärmepumpe und Kompensator keine Rohrschellen mehr angebracht werden.
- Der Elektriker darf mit starren Blech- oder PVC- Kanälen keine Schallbrücke zum Baukörper herstellen.
- Ist das Schalldämmgehäuse am unteren Rand offen, muss der Zwischenraum für die Vermeidung von Luftschall mit einem Dichtband geschlossen werden.

5. Planerische Aspekte

5.1 Erdsondenfeld

5.1.1 Planen von Erdsondenanlagen

In diesem Kapitel sollen kurz die wichtigsten Punkte, die bei der Auslegung von Erdwärmesonden beachtet werden sollten, zusammengefasst. Die nachstehenden Ausführungen basieren auf der SIA- Dokumentation "Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme".

Die Wärmequelle Erdsonden hat gegenüber Grundwasser und Aussenluft den Nachteil, dass die nutzbare Wärmemenge pro Jahr begrenzt ist. Wird der Sonde zuviel Wärme entzogen, kann das Erdreich um die Sonde gefrieren. Dabei bildet sich ein Hohlraum zwischen der Sonde und dem Erdreich der als Isolationsschicht wirkt und den Wärmefluss zur Sonde hin unterbindet. Dieser Schaden ist irreparabel, die Sonde ist zerstört. Die Dimensionierung der Sonde hat das Ziel, diesen Vorgang zu verhindern. Die Auslegung sollte nach folgendem Schema erfolgen:

1. Dimensionieren der Wärmepumpe

Bestimmung der Leistungsdaten des Gebäudes:

- Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2 in kW. Dieser ist möglichst genau zu berechnen.
- Warmwasserverbrauch in ltr/d à 60°C nach Tabellen aus der Fachliteratur.
- Leistungsreserve für Warmwasser: Aufheizen des Tagesverbrauchs innerhalb 20 Stunden (2x2h EW-Sperre). Dieser Wert kann in gut isolierten Mehrfamilienhäusern bis zu 20% des Wärmeleistungsbedarfes ausmachen.

$$Q_{\text{soll WP}} = Q_{\text{SIA384/2}} + Q_{\text{BW}} = Q_{\text{SIA384/2}} + \frac{V_{\text{BW}} * 4.18 * 50}{3600 * 20} \quad [\text{GI 15}]$$

$Q_{\text{h,soll WP}}$	Sollleistung der Wärmepumpe
$Q_{\text{SIA384/2}}$	Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2
Q_{BW}	Leistungsreserve für Warmwasser
V_{BW}	Warmwasser à 60°C pro Tag

2. Bestimmen der Wärmepumpe

Die Leistung der Wärmepumpe bei maximaler Vorlauftemperatur und Soleeintrittstemperatur 0°C sollte minimal $Q_{\text{h,soll WP}}$ sein.

Wichtige Betriebsdaten der Wärmepumpe

- Heizleistung bei Auslegungsbedingungen z.B. BOW50
- Verdampferleistung Q_0 bei BOW35
- Elektrische Nennleistung P_{NT}
- Betriebsstrom der Wärmepumpe I_{max}
- Anlaufstrom I_A der Wärmepumpe mit Sanftanlasser

Mit dem zuständigen Elektrizitätswerk sollte abgeklärt werden, ob die Netzsituation beim Objekt den Anschluss der Wärmepumpe zulässt. Ist dies nicht der Fall, kann die Wahl einer Wärmepumpe mit einem anderen Kältemittel z.B. R407c oder R410A anstelle R134a die Situation retten.

3. Auslegung der Erdwärmesonden

Je nach geologischen Verhältnissen kann dem Boden mehr oder weniger Wärme entzogen werden. Nachstehende Tabelle gibt dazu Anhaltspunkte:

Tabelle 9: Geologische Parameter für Erdsondendimensionierung

Geisteinsart	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Spez. Entzugsleistung der Sonde (W/m)	Entziehbare Energie (kWh/ma)
Festgestein (z.B. Sandstein)	>3	max. 80	135
Lockergestein gesättigt (z.B. Mergel)	>2	45 – 60	100
Lockergestein trocken (z.B. Ton)	>1.5	max. 30	65

Da vor Ausführung der Bohrungen der genaue Bodenaufbau nicht bekannt ist, wird die Längenbestimmung der Sonden mit 50 W/m vorgenommen. Wird das ganze Jahr über das Brauchwarmwasser mit der Wärmepumpe aufgeheizt, kann sich die Sonde im Sommer weniger regenerieren. Die Auslegung wird in diesem Fall mit 45 W/m gemacht.

$$LS = \frac{Q_{0WP} (B0W35)}{q_{spez}} \quad [GI 16]$$

LS Länge der Erdsonden in m
 Q_{0WP} Kälteleistung der Wärmepumpe bei B0W35
 q_{spez} maximale spezifische Entzugsleistung der Sonde in W/m

Nach der Bestimmung der totalen Sondenlänge erfolgt die Detailplanung der Erdsondenanlage. Am besten wird dies in Zusammenarbeit mit einer erfahrenen Bohrfirma gemacht. Diese kennt die zu erwartende Bodenbeschaffenheit der Gegend in etwa und kann die maximal mögliche Bohrlänge bekannt geben.

Die Sondenanlage wird nach folgenden Gesichtspunkten optimiert:

- Länge und Anzahl der Sonden
- Druckverlust für Umwälzpumpe
- Sondendurchmesser:
 - Ø32mm mit Längen bis zu 150m
 - Ø40mm mit Längen bis zu 240m
- Abstand der Sonden. Es ist ein Abstand von 8m zwischen den einzelnen Sonden anzustreben.
- Fliessgeschwindigkeit in den Sondenrohren in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers und dem vom Wärmepumpenhersteller geforderten Durchfluss am Verdampfer. Es sollte eine turbulente Strömung angestrebt werden.

Fliessgeschwindigkeit in Sondenrohren	Ø32mm	0.51m/s
	Ø40mm	0.38m/s
- Kosten der Sonden. Dabei ist auch die Grösse des Sondenverteilers zu berücksichtigen.

4. Kontrolle des maximalen Wärmeentzugs pro m Sonde und Jahr

Um eine Übernutzung der Sonde zu verhindern darf neben der maximalen Entzugsleistung in W/m Sonde auch die maximale entzogene Energiemenge pro Jahr nicht überschritten werden.

$$Q_{a\text{Sonde}} = \frac{(Q_{a\text{RH}} + Q_{a\text{BW}}) \times Q_{o\text{WP}}}{Q_{h\text{WP}} \times LS} < 100 \text{ kWh/a} \quad [\text{GI 17}]$$

$Q_{a\text{Sonden}}$	Wärmeentzug pro m Erdsonde und Jahr in kWh/ma
$Q_{a\text{RH}}$	Jahreswärmeverbrauch für Raumheizung in kWh/a
$Q_{a\text{BW}}$	Jahreswärmeverbrauch für Brauchwarmwasserbereitung in kWh/a
$Q_{o\text{WP}}$	Kälteleistung der Wärmepumpe bei mittleren Betriebsbedingungen (z.B. B0W45)
$Q_{h\text{WP}}$	Heizleistung der Wärmepumpe bei mittleren Betriebsbedingungen (z.B. B0W45)
LS	Gesamtlänge der Erdwärmesonden

Der erhaltene Wert sollte für die Dimensionierung der Anlage 100 kWh/ma nicht überschreiten.

5. Thermische Aufladung

Ziel der thermischen Aufladung einer Erdsonde ist das längerfristige Absinken der Soletemperatur zu vermeiden. Ohne Aufladung sinkt die Erdreichtemperatur um die Sonden im ersten Jahr um 1°C. Nachher beträgt der Temperaturverlust ca. 0.1°C pro Jahr. Eine thermische Aufladung kann eine vollständige Erholung des Erdreichs um die Sonden bewirken.

6. Einfluss von Grundwasser auf die Sondenleistung

In Gerzensee traf man in einer Tiefe von 50m bei den meisten Bohrlöchern auf Grundwasser. Dies hat folgende Auswirkungen auf die Entzugsleistungen:

- Grundwasser garantiert einen guten Kontakt zwischen Erdreich und Sonde.
 - Fließt das Grundwasser mit einer Geschwindigkeit >1 cm pro Tag steigt die pro Jahr nutzbare Wärmemenge beträchtlich an.
 - Die spezifische Entzugsleistung in W/m ändert sich wenig.
 - Auslegungsdaten mit Grundwasser:
- | | |
|---------------------|----------------|
| q_{spez} | 70 – 80 W/m |
| $Q_{a\text{Sonde}}$ | bis 500 kWh/ma |

7. Bauaustrocknung

Für die Bauheizung benötigt ein Gebäude ein vielfaches der Jahresenergie für Raumheizung. Da den Erdsonden nicht beliebig viel Energie entzogen werden kann, darf eine Wärmepumpe mit Erdsonden unter keinen Umständen für die Bauaustrocknung eingesetzt werden. Weil eine separate Bauheizung zusätzliche Kosten verursacht, führt dieser Sachverhalt immer wieder zu hitzigen Diskussionen mit der Bauherrschaft.

5.1.2 Kontrolle der Planungsdaten in Gerzensee

Anhand der Anlage in Gerzensee sollen die für die Planung der Anlage getroffenen Annahmen mit den auf der Anlage gemessenen Werten verglichen werden.

Tabelle 10: Kontrolle der Planungsannahmen in Gerzensee

	Projekt	Ausführung	
Leistungsdaten Anlage			
Nutzenergieverbrauch	761'100 kWh	655'540 kWh	
max. Wärmeleistung Verbraucher	255 kW	1)	300 kW
max. Wärmeleistung WP + Heizkessel	240 + 300 = 540 kW	1)	440 kW
max. Wärmeleistung der Wärmepumpe	(B0W35) 264 kW	ca. 250 kW	
Auslegung Erdsondenfeld			
Maximale Leistung am Verdampfer	212 kW	ca. 200 kW	
Spez. Sondenbelastung	45 W/m	41.97 W/m	
Sondenlänge	4'800 m	4'765 m	
Geologische Verhältnisse am Bohrort	Lockergestein gesättigt	Polygene Nagelfluh, Siltstein 2)	
Wärmeleitfähigkeit Boden	>2.0 W/m	2.64 W/m	
Spezifische Wärmekapazität		2.15 MJ/m3K	
Entzogene Wärmemenge pro m Sonde	100 kWh/m	86.82 kWh/m	

- 1) Spitzenwerte während Aufheizbetrieb am Morgen
- 2) Total wurden durch den Geologen 3 Bohrungen aufgenommen. Bei zwei Bohrungen wurde in einer Tiefe von 44 bis 62 m Wasserzutritte festgestellt. Bei der letzten, östlich gelegenen Bohrung war dies nicht der Fall. Die Verhältnisse für den Bohrmeister waren schwierig. So mussten die Bohrungen bis in eine Tiefe bis zu 58 m mit einer temporären Verrohrung versehen werden, um ein Einstürzen der Bohrlöcher zu verhindern. Das Einbringen der Sondenrohre in die Bohrlöcher wurde durch das Grundwasser behindert, da die Auftriebskraft des Grundwassers ab einer Tiefe von 44m die Schwerkraft der Sondenrohre und des Stahlbolzens aufhob. Das führte dazu, dass einige Sondenrohre auf einer Tiefe von 130 m hängen blieben.

Die Belastung des Erdsondenfeldes liegt im projektierten Rahmen. Die minimalen Soleeintrittstemperaturen liegen mit +4.7°C deutlich über der Projektannahme von 0°C. Der Wärmeleistungsbedarf der Anlage liegt vor allem im Aufheizbetrieb während Kälteperioden über den berechneten 255 kW. Ein monovalenter Wärmepumpenbetrieb wäre mit den installierten Wärmepumpen nicht möglich gewesen.

Geometrie des Sondenfeldes

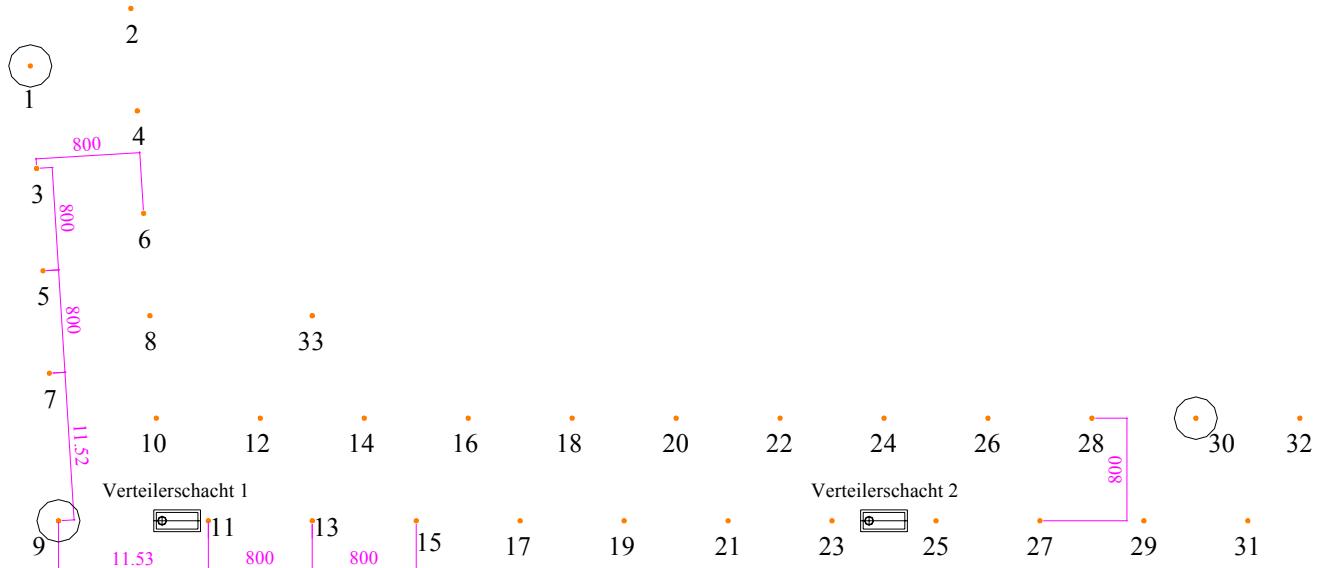


Bild 13: Bohrplan des Erdsondenfeldes

Die Bohrungen 1, 9 und 30 wurden durch den Geologen aufgenommen. Bohrungen 1 und 9 wiesen Wasserzutritte auf. In den Verteilerschächten 1 und 2 wurden die Sondenverteiler montiert.

5.1.3 Temperaturniveau im Erdsondenkreislauf

5.1.3.1 Jahresverlauf der Temperaturen im Sondenkreislauf

In folgendem Diagramm ist der Jahresverlauf für die beiden Auswertungsjahre der Soleeintrittstemperatur T1 und der Soleaustrittstemperatur T2 sowie der Aussentemperatur dargestellt. Bei den Temperaturen handelt es sich um Mittelwerte pro Monat.

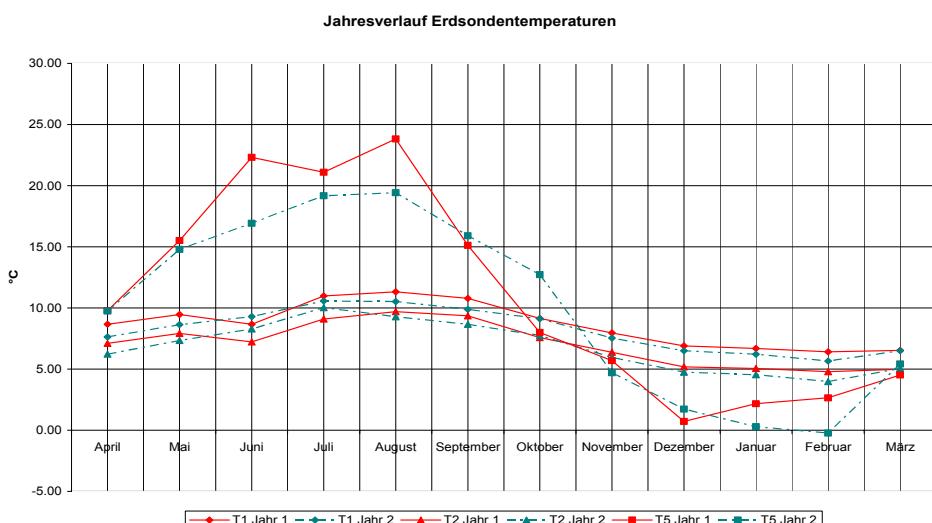


Bild 14: Jahresverlauf der Erdsonden- und Aussentemperatur

Die mittleren Soleeintrittstemperaturen betragen im Winter 6°C und im Sommer 13.5°C. Während Kälteperioden im Winter sank die Vorlauftemperatur vom Sondenfeld auf minimal 4.7°C ab. Im Sommer erholten sich die Temperaturen wieder auf 13.6°C.

Im Schnitt waren die Erdsondenterperaturen trotz Wärmeeintrag im Sommer im zweiten Auswertungsjahr um 0.70°C tiefer als im ersten Jahr.

Der Wärmeeintrag vom Mai bis September 2004 war mit 991 kWh zu den gleichzeitig entzogenen 73'850 kWh zu gering, um die Erdsondenterperaturen beeinflussen zu können. Der Einfluss des Wärmeeintrages in das Erdreich war nur sehr kurzfristig spürbar.

5.1.3.2 Kühlbetrieb im Sommer

Der Mehrzwecksaal wird im Sommer mit der im Erdreich gespeicherten Kälteenergie gekühlt. Dazu ist eine Kühlbatterie in den Zuluftkanal der Lüftungsanlage eingebaut worden. Eine separate Kühlpumpe im Sondenverteiler zirkuliert die Sole über eine neu erstellte Fernleitung vom Sondenfeld zur Kühlbatterie.

Im nachstehenden Diagramm sind neben der Aussentemperatur der Solevor- und Rücklauf im Tagesgang dargestellt. Die Soletemperaturen vor und nach dem Kühlbetrieb werden nicht dargestellt, weil zu dieser Zeit die Anlage nicht zirkulierte und sich die ruhende Flüssigkeit in den Rohren erwärmte.

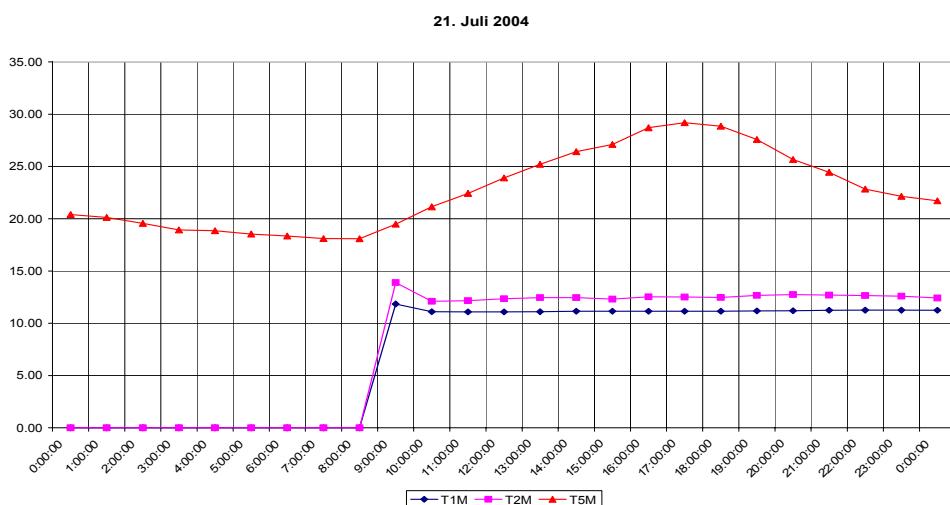


Bild 15: Kühlbetrieb am 21.07.2004

Leistungsdaten: - maximale Kühlleistung $Q_{0\text{ MZS}} = 11.0 \text{ kW}$
- maximaler spezifischer Wärmeeintrag pro Meter Sonde 2.31 W/m

Nach dem Temperaturausgleich zu Beginn der Kühlung stabilisierte sich der Solevorlauf bei 11.10°C. Der Anstieg bis zum Ende des Kühlbetriebs um Mitternacht betrug nur 0.15°C. Der Rücklauf zum Sondenfeld betrug maximal 12.74°C. Bei parallelem Wärmeentzug für die Wärmepumpen sanken die Vorlauftemperaturen auf 8 - 9°C ab.

Im Jahresverlauf erhöhten sich die Vorlauftemperaturen von 9.5°C im Mai auf 11.50°C Anfang September. Dabei ist zu beachten, dass der Sommer 2004 eher kühl und mit wenigen Hitzetagen war. Den ganzen Sommer über wurde zudem den Sonden ein vielfaches der eingetragenen Energie wieder entzogen.

Für die Planung von Anlagen mit mehr spezifischer Kühlleistung pro Meter Sonde als 2.31 W/m

muss zur Dimensionierung der Kühlbatterie mit deutlich höheren Vorlauftemperaturen als 11°C gerechnet werden. Die Auslegung der Batterie in Gerzensee erfolgte mit folgenden Daten:

Luftmenge:	6'000 m3/h
Kühlleistung	21.0 kW
Solevorlauf	16°C
Solerücklauf	20°C
Lufteintrittstemperatur	32°C
Luftaustrittstemperatur	21°C
Max. spezifische Kühlleistung pro m Sonde	20 W/m
Kühlleistungspotential des Erdsondenfeldes	96 kW

5.1.3.3 Verhalten bei Kälteperioden

Die Temperaturen im Erdsondenkreislauf reagierten schnell auf Leistungsschwankungen der Wärmepumpe. Im nachstehenden Diagramm sind die Soletemperaturen sowie die Heiz- und Kälteleistungen der gesamten Wärmepumpenanlage am 16.12.04 dargestellt.

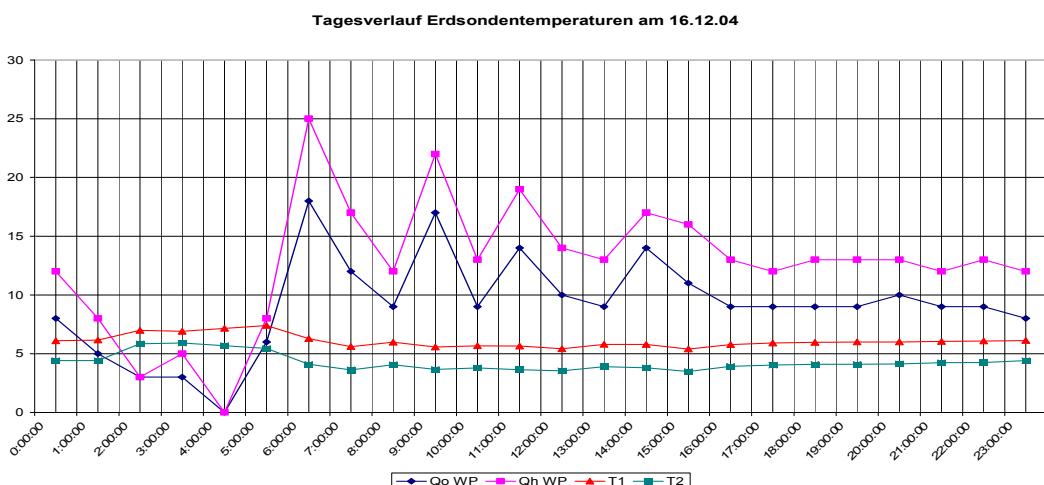


Bild 16: Kältetag 16.12.2004

Legende:	Q_o WP	Verdampferleistung von Wärmepumpe 1 + 2 in kW (effektive Leistung um Faktor 10 höher)
	Q_h WP	Kondensatorleistung von Wärmepumpe 1 + 2 in kW (effektive Leistung um Faktor 10 höher)
	T1	Temperatur Solevorlauf in °C
	T2	Temperatur Solerücklauf in °C

Innerhalb eines Tages treten Temperaturschwankungen von 2°C auf. Diese sind direkt abhängig von der Verdampfer- und Heizleistung der Wärmepumpe. Beim Aufheizvorgang am Morgen mit einer Spitzenheizleistung von 250 kW sank die Vorlauftemperatur innerhalb von zwei Stunden um 1.8°C. Bei kleineren Leistungen erholen sich die Soletemperaturen relativ rasch. Am 17.12.04 waren um 5 Uhr bereits wieder Vorlauftemperaturen von 7.6°C zu verzeichnen.

Die Wärmepumpen in Gerzensee waren nie während 24 Stunden mit 100% Vollast in Betrieb. Die Erdsonden hatten so Zeit, sich zu regenerieren. Das schnelle Absinken der Soletemperaturen bei 250 kW Heizleistung um 6 Uhr gibt einen Hinweis darauf, was bei zu knapp dimensionierten Anlagen und einer Wärmepumpe, die während mehreren Tagen auf Vollast läuft, passieren kann.

5.2 Planung von Grosswärmepumpenanlagen

Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung von 120 kW wie diejenige in Gerzensee sind Spezialanfertigungen. Für die Planung solcher Anlagen ist daher eine frühzeitige Zusammenarbeit mit Wärmepumpenfabrikant, Elektrizitätswerk und Elektroplaner unabdingbar.

5.2.1 Bewilligungsverfahren, Abklärungen

1. Erdsondenbohrungen

Für das Bohren von Erdwärmesonden ist eine Bewilligung bei den kantonalen Behörden einzuholen. Sonden dürfen in Zone B, je nach Situation auch in Zone A erstellt werden. In Schutzzonen, in Gebieten mit Grundwasser sowie an Orten mit bekannten Erdgasvorkommen ist das Bohren untersagt.

Als erstes muss daher mit einer Voranfrage bei der zuständigen, kantonalen Stelle abgeklärt werden, ob am vorgesehenen Standort ein Abteufen von Erdwärmesonden überhaupt erlaubt ist.

2. Situation vor Ort

Nach einer groben Bestimmung der Sondenlänge, Anzahl Bohrungen und der Bohrtiefe sind am Anlagestandort folgende Punkte abzuklären

- Ist der notwendige Platz für die Erdwärmesonden mit den notwendigen Abständen zwischen den Sonden, zum Gebäude und zu öffentlichen Straßen überhaupt vorhanden?
- Wo verlaufen die Werkleitungen wie Wasser, Strom, Telefon, Kanalisation?
- Ist die Zufahrt für die Bohrfahrzeuge und die Muldenlastwagen gewährleistet?
- Ist genügend Platz für die Bohrgestänge, Schlammulden etc. vorhanden?
- Wo können die Erdsondenverteiler platziert werden?
- Wo können Leitungsgräben für die Sondenanschlüsse gezogen werden.

Eine Begehung mit dem zuständigen Sachbearbeiter der Bohrfirma vor Ort ist im Zweifelsfall zu empfehlen.

3. Elektrischer Anschluss

In den letzten Jahren kommt es immer häufiger vor, dass elektrische Netze für den Anschluss selbst von kleineren Wärmepumpen zu schwach sind. Eine vorzeitige Abklärung der Netzsituation mit dem Elektrizitätswerk und die Aufnahme der Hauptsicherung vor Ort wird immer wichtiger, um unliebsamen Ärger bei der Ausführung der Anlage zu verhindern.

Bei Anlagen wie derjenigen in Gerzensee ist eine Abklärung der Netzsituation und der Anschlussbedingungen mit dem Elektrizitätswerk schon am Anfang der Planung notwendig.

5.2.2 Elektrische Anschlussdaten

Nachstehend sind die elektrischen Daten der beiden Wärmepumpen in Gerzensee aufgeführt:

- Anzahl Wärmepumpen	2 Stk
- Anzahl Kompressoren total	4 Stk
- Betriebsstrom pro Wärmepumpe	$83A + 83A = 166A$
- Maximaler Anlaufstrom pro Wärmepumpe	$83A + 170A = 253A$
- Anlaufstrom der gesamten Anlage	$83A + 83A + 83A + 170A = 419A$
- $\cos \phi$	0.64 – 0.81 je nach Betriebspunkt
- Blindleistung	20.1 – 23.8 kVAR

Diese Daten ergeben sich für das Kältemittel R134a. Obwohl diese in der Praxis nie erreicht werden, sind die Werte am Kompressor angeschlagen und daher für das Elektrizitätswerk

massgebend.

Wird der Anschluss vom Werk unter keinen Umständen bewilligt, stehen noch folgende Hintertüren zur Rettung der Wärmepumpenanlage offen:

- Wahl eines anderen Kältemittels. R407c und R410a haben in etwa die halben Betriebs- und Anlaufströme. Da Vorlauftemperaturen von über 65°C mit diesen Alternativen ohne spezielle Kompressoren nicht erreicht werden können, müssen planerische Vorkehrungen wie Änderung des Konzeptes für die Warmwasserbereitung oder die Zuschaltung eines Zusatzwärmeerzeugers geprüft werden
- Auf dem Markt sind sogenannte Switchboxen (Frequenzumformer) vorhanden, die den Anlaufstrom einer Wärmepumpe um ca. 50% senken können.

5.2.3 Bauliche Massnahmen

Auf der Anlage sind folgende baulichen Gegebenheiten zu überprüfen. Bei der Sanierung von Anlagen muss dabei auf bestehende Räumlichkeiten Rücksicht genommen werden.

1. Notwendige Grösse der Energiezentralen. Diese müssen Platz für die Wärmepumpen, die Pufferspeicher (Inhalt ca. 30litr pro kW Wärmepumpenleistung), die Hydraulik, Expansionsanlagen, Zusatzheizkessel, Warmwasserboiler etc. haben.
2. Das Einbringen der Wärmepumpen muss möglich sein. Da Wärmepumpen in dieser Grösse Massanfertigungen sind, können die Abmessungen mit dem Wärmepumpenhersteller optimiert werden.
3. Die Positionierung der Erdsondenverteiler muss überprüft werden. Für die total 33 in Gerzensee gebohrten Erdwärmesonden wurden zwei Verteiler/Sammler mit je 17 Abgängen hergestellt. Die Länge pro Verteiler betrug 2840mm. Die Verteiler sollten nicht zu weit von den Sondenstandorten gesetzt werden, da sonst ein Bündel von 66 Sondenleitungen über längere Distanz geführt werden muss. In Gerzensee wurden dazu auf dem Sondenfeld 2 Verteilerschächte in Ortsbeton mit den Abmessungen 3.2m x 1.3m x 2.2m (L x B x H). Der Zugang zu den Schächten wird über zwei Betonrohre mit Deckel Ø60cm gewährleistet.
4. Folgende Massnahmen für das Erdsondenfeld müssen geprüft werden:
 - Welche Werkleitungen behindern die Bohrungen.
 - Bei Neubauten ist der Bohrtermin mit dem übrigen Bauablauf und der Behinderung durch die Bauplatzinstallationen frühzeitig mit der Bauleitung zu koordinieren.
 - In Gerzensee wurden die Sonden in einem landwirtschaftlich genutzten Feld abgeteuft. Da der Bauer nach den Bohrarbeiten nicht eine Schalmm- und Steinwüste vorfinden wollte, musste das Terrain vor den Arbeiten abhumusiert werden.
 - Für die Bohrschlammensorgung muss genügend Platz für die Mulden vorhanden sein. Ist bei den Bohrungen Grundwasser vorhanden, kann sich die Schlammmenge vervielfachen. Um die Kosten für die Schlammentsorgung zu senken, muss der Bohrschlamm über mehrere Mulden geleitet werden, die als Absetzkammern dienen und das Wasser soweit möglich ausscheiden. Das gereinigte Wasser kann nachher in eine Kanalisation geleitet werden. Dies sollte vorher mit den Behörden geklärt werden.

5.2.4 Hydraulische und regeltechnische Vorkehrungen

Unter Berücksichtigung vorhandener Bedingungen bei Sanierungen müssen folgende Parameter bestimmt werden:

1. Raumheizung
 - Maximale Vorlauftemperaturen von bestehenden Wärmeverteilungen.
 - Bei Neubauten sollten die Vorlauftemperaturen der Wärmeverteilungen 45°C nicht übersteigen. Mit Wärmepumpen sollte anstelle von Heizkörpern Bodenheizungssysteme eingesetzt werden. Heizkörper mit tiefen Vorlauftemperaturen haben grosse Heizflächen. Diese können mit den heute üblichen raumhohen Grossverglasungen kaum mehr vernünftig platziert werden.
2. Warmwasserbereitung
 - Muss mit der Wärmepumpe Brauchwarmwasser aufbereitet werden?
 - Können die Boiler in der gleichen Heizzentrale aufgestellt werden oder muss die Aufbereitung über Fernleitungsnetze erfolgen?
 - Welche Zusatzenergien stehen für die Sicherstellung der Hygienetemperatur von 63°C zur Verfügung.

Vorstehende Parameter haben einen direkten Einfluss auf die Auslegung der Anlage.

Bestimmung der maximalen Vorlauftemperatur

1. Bestimmung der maximalen Vorlauftemperatur der Wärmepumpe. Bestehende Wärmeverteilungen mit Betriebstemperaturen 60/50° können nicht ohne zusätzliche Massnahmen wie das verstärken der Gebäudeisolierung oder die Montage von grösseren Heizflächen mit tieferen Vorlauftemperaturen betrieben werden.
2. Müssen diese Abnehmer noch über längere Fernleitungsnetze versorgt werden, ergeben sich für die Wärmepumpe Vorlauftemperaturen von 65°C.

Warmwasserbereitung

Das Konzept für die Brauchwarmwasserbereitung hat einen entscheidenden Einfluss auf die hydraulische Verrohrung und den notwendigen regeltechnischen Aufwand.

1. Muss kein Warmwasser aufbereitet werden und ist eine Wärmeverteilung mit Vorlauftemperaturen unter 45°C vorhanden, kann mit den Kältemitteln R407C oder R410A die Wärmeversorgung ohne zusätzliche Energiequelle und mit sehr guten Arbeitszahlen gewährleistet werden. Die Regulierung kann mit den marktüblichen, kostengünstigen Wärmepumpenreglern gewährleistet werden.
2. Wird das Warmwasser in einem zentralen Boiler aufbereitet, wärmt die Wärmepumpe je nach eingesetztem Kältemittel das Wasser auf 45 – 55°C vor und mit Elektroeinsätzen wird während der Nacht auf die erforderlichen 63°C nachgeheizt. Dabei muss folgendes beachtet werden:
 - Das Boilervolumen sollte für die optimale Nutzung des Niedertarifstromes auf den ganzen Tagesbedarf dimensioniert werden. 14 Wohnungen ergeben schon Boilervolumen von 2'500 ltr. Für grosse Überbauungen kann dieses Konzept daher kaum angewendet werden.
 - Die Wärmetauscher in den Boilern müssen die volle Kondensationswärme abgeben können, um Hochdruckstörungen in der Endphase der Warmwasserbereitung zu vermeiden. Die Anwendung von Registerboiler ist daher auf kleinere Wärmepumpen begrenzt. Grössere Leistungen müssen mit Plattenwärmetauscher ausgerüstet werden.
 - Für dieses Konzept können ebenfalls marktübliche Regler eingesetzt werden.
3. Erfolgt die Warmwasseraufbereitung in externen Unterstationen über ein Fernleitungsnetz,

müssen noch die Verluste der Fernleitung beachtet werden. Je nach eingesetztem Kältemittel können mit der Wärmepumpe nur noch Boilertemperaturen von 40-52°C erreicht werden. Bei diesem Konzept muss folgendes beachtet werden:

- Die Boiler in den Unterstationen sind auf den vollen Tagesbedarf auszulegen. Zirkulationssysteme entladen die Boiler kontinuierlich und provozieren Tagesnachladungen, die unbedingt vermieden werden sollten. Diese Systeme sollten nicht mehr angewendet werden.
- Für die erforderliche, elektrische Nachladung müssen die Freigabezeiten der Elektro-einsätze mit dem EW abgestimmt werden. Übliche Ladezeiten sind:

Vorwärmen mit der Wärmepumpe	22:00 – 01:00
Nachheizen mit Elektro-einsätzen	01:00 – 05:00

Die Wärmetauscher, die Elektro-einsätze sowie die Leistungsreserve der Wärmepumpen für die Boilerladung sind auf diese Zeiten abzustimmen.

- Um eine Boilertemperatur von 52°C in den Unterstationen erreichen zu können, muss die Vorlauftemperatur der Fernleitung in der Zentrale minimal 60°C betragen. Dabei ist die Trägheit der Hydraulik zu beachten. Eine Hochhalteregelung im Kondensatorkreis ist unbedingt erforderlich, damit der Fernleitung sofort die erforderliche Temperatur zur Verfügung steht und nicht zuerst die Pufferspeicher auf Solltemperatur hochgefahren werden müssen.
- Mit dem Kältemittel R134a sind Vorlauftemperaturen bis 65°C problemlos möglich. Daher ist dieses für solche Anlagen bestens geeignet.
- Für solche Systeme muss regeltechnisch ein grösserer Aufwand betrieben werden. Der Einsatz von DDC- Systemen ist erforderlich, um die verschiedenen Betriebszustände und Wärmeanforderungen innerhalb der Anlage in den Griff zu bekommen.
- Bei der Kondensatoraustrittsregelung ist neben dem Temperaturfühler im Kondensator-austritt ein Druckfühler im Kältekreis der Wärmepumpe einzubauen. Das Dreiwegventil ist so einzubauen, das der Anlagerücklauf am Bypass angeschlossen wird und ein elektro-hydraulischer Antrieb SKD 62 verwendet wird. Droht eine Hochdruckstörung, kann über den Bypass mit der hydraulischen Rückstellung des Antriebs sofort kaltes Rücklaufwasser in den Kondensatorkreis gespießen werden.

4. In grossen Wohnüberbauungen kann anstelle einer Grosswärmepumpe mehrere kleinere Einheiten in den einzelnen Unterstationen installiert werden. Die Warmwasserbereitung erfolgt dann nach dem in Punkt 2 beschriebenen Konzept. Vor allem bei Grundwasser als Wärmequelle ist diese Variante sinnvoll. Anstelle der Wärme kann ab dem zentralen Brunnen das Wasser verteilt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Variante ist die verminderte Störanfälligkeit durch den Einsatz mehrerer Wärmeerzeuger.

5.2.5 Besonderheiten bei der Installation von Grosswärmepumpen

Nachstehend sind noch einige Punkte aufgeführt, die bei der Installationsarbeiten in Gerzensee speziell aufgefallen sind:

1. Bei der Planung der elektrischen Kabelkanäle sollte darauf geachtet werden, dass drei separat geführte Trassen installiert werden.

Trasse 1 Niederspannung 24V für Fühler, Busleitungen etc. Es sollten abgeschirmte Kabel verwendet werden.

Trasse 2 Netz für Steuerbefehle, kleinere Umwälzpumpen, Ventilantriebe.

Trasse 3 Kraftleitungen 3x400 V für Wärmepumpen

Dass Niederspannungskabel separat geführt werden müssen, war bekannt. Die Kabel für die Steuerbefehle der Wärmepumpe wurden aber parallel zu den Kraftleitungen der Wärmepumpe geführt. Bei der Inbetriebnahme der Anlage konnte Wärmepumpe 1 von der DDC- Regelung nicht mehr ausgeschaltet werden. Der Grund dafür war, dass durch Induktion der Kraftleitungen beim Steuerkabel eine Spannung von 120V anstand. Dies reichte, um das Relais bei der Wärmepumpe zu ziehen. Bei der zweiten Wärmepumpe waren es immer noch 110V. Die Ausschaltung funktionierte jedoch.

2. Der Erdsondenkreislauf wird im Extremfall mit Temperaturen von 0/-3°C betrieben. Daher ist die Verrohrung aus korrosionsfesten Materialien zu erstellen. Zudem darf die Sondenflüssigkeit, eine Äthylenglykol- Wassermischung mit 30% Glykolanteil nicht mit verzinkten Materialien in Berührung kommen, weil das Glykol mit dem Zink eine chemische Reaktion eingehet. Die Zinkschicht wird zerstört und die Inhibitoren im Glykol zerfallen. Am besten haben sich Kunststoffrohre in der Druckstufe S5 bewährt. Die Erdwärmesonden sowie die Sondenverlängerungen sind aus dem gleichen Material hergestellt. Die Isolierung der Rohre sollte schwitzwasserdicht sein. Am günstigsten ist eine Dämmung mit dampfdicht verklebten Armaflexplatten mit 19mm Stärke.
3. Die Erdwärmesonden in Gerzensee wurden mit 16'500 ltr Antifrogen N – Wassergemisch gefüllt. Diese Menge kann mit vernünftigem Aufwand nicht mehr vor Ort gemischt und eingefüllt werden. Diese Glykoltmengen können fertig vorgemischt beim Hersteller bezogen werden. Die Anlieferung erfolgt per Lastwagen direkt ab Werk in Deutschland. Der Tanklastwagen ist mit einer Pumpe ausgerüstet, die das Glykol in die Anlage drückt. Nach dem Bohren werden die Erdwärmesonden von der Bohrfirma mit Wasser aufgefüllt. Dieses Wasser muss beim Einbringen der Glykol- Wassermischung zuerst in die Kanalisation abgeleitet werden. Die entsprechenden Schlauchstutzen müssen bei der Verrohrung der Anlage vorgesehen werden.

5.3 Wahl des Kältemittels R134a

In Kapitel 5.2 ist dargelegt worden, dass je nach Anlagekonzept und bestehenden Wärme-Verteilungen verschiedene Vorlauftemperaturen notwendig sind. In der Wärmepumpentechnik werden heute verschiedene Kältemittel mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt. Nachstehend werden die wichtigsten Kältemittel aufgeführt und ihre Vor- und Nachteile erläutert.

5.3.1 Überblick über Kältemittel

Seit 1994 sind FCKW- Kältemittel wie R12 und R502 verboten, weil diese für die Zerstörung der Ozonschicht verantwortlich sind. Die Übergangskältemittel R22 und R123 (H-FCKW) sollten ebenfalls seit 2002 nicht mehr eingesetzt werden, da sie noch immer ein gewisses Ozonabbaupotential haben. Die Kältemittel gliedern sich in folgende Gruppen:

1. Übergangskältemittel H-FCKW (teilweise chlorhaltig) R22, R123
2. Langfristige Kältemittel
 - 2.1 H-FKW (chlorfrei)
 - 2.1.1 Einstoffkältemittel: R134a
 - 2.1.2 Gemischte Kältemittel: R404A, R407C, R410A, R507
 - 2.2 Natürliche Kältemittel, halogenfrei
 - 2.2.1 Einstoffkältemittel: R717, R718, R290, R600a, R744
 - 2.2.2 Gemischte Kältemittel: R290+, R600a-

Bei der Wahl der Kältemittel sind neben den physikalischen Einsatzgrenzen auch folgende Parameter wichtig:

- Treibhauserwärmungspotential
- Explosionsgrenze
- Brennbarkeit
- Wassergefährdung
- MAK- Wert
- chemische Stabilität
- technische Parameter wie volumetrische Kälteleistung, Leistungszahl COP, Druckverhältnis, Kondensationsdruck etc.

5.3.2 Wichtigste Kältemittel für Wärmepumpentechnik

- R134a
- Kältemittel mit sehr grossem Einsatzbereich
 - Für grössere Anlagen mit Kondensationstemperaturen über 60°C praktisch die einzige Möglichkeit.
 - Hohes Druckverhältnis
 - Leistungszahlen ca. 15% tiefer als bei R407C
 - Tiefer Kondensationsdruck bei hohen Kondensationstemperaturen
- R407C
- Ermöglicht überdurchschnittliche Leistungszahlen
 - Heizungswasser bis 52°C möglich.
 - Bei höheren Temperaturen wird Kondensationsdruck zu hoch. PN 25 Anlagen sind nicht mehr realisierbar
 - Bei kleineren Leistungen können spezielle Kompressoren mit Dampf- Zwischen-einspritzung eingesetzt werden, die Vorlauftemperaturen bis 65°C ermöglichen.

R410A	<ul style="list-style-type: none"> - Überdurchschnittliche Leistungszahlen - In PN25- Anlagen nur bis zu einer Kondensationstemperatur von 35°C einsetzbar. - Wärmepumpen werden mit 42 bar abgesichert, damit sind Vorlauftemperaturen bis 62°C zu erreichen. - Moderate Werte beim Druckverhältnis p_1/p_0 - Unerreichte volumetrische Kälteleistung, daher sehr kompakte Bauweise der Anlagen. - Mit Beginn der Serienproduktion von PN40- Kompressoren im Jahr 2002/ 2003 hat der Einsatz von R410A stark zugenommen. Im Leistungsbereich bis 50 kW sind Sandartkomponenten vorhanden.
R290 - Propan	<ul style="list-style-type: none"> - Über gesamten Temperaturbereich einsetzbar - Bei $t_c > 65^\circ\text{C}$ neben R134a einzig einsetzbares Kältemittel - Die Leistungszahlen sind etwas höher als diejenigen von R134a, aber 5% tiefer als bei R407C - Sicherheitsauflagen wegen Explosionsgefahr. Für Aussenaufstellung erlaubt. Für Innenaufstellung mit Sicherheitsauflagen erlaubt.
R717 - Ammoniak	<ul style="list-style-type: none"> - Beste Arbeitszahlen bis $t_c = 45^\circ\text{C}$. Einsatzbereich in Wärmepumpentechnik bis zu Vorlauftemperaturen von 50°C - Weiter Anwendungsbereich in Kältetechnik mit $t_o = -15^\circ\text{C}$ bis zur Wärmepumpentechnik - hohe volumetrische Kälteleistung ergibt kleine Füllmengen und kleine Verdichter - toxische Wirkung, daher Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften
R404A	<ul style="list-style-type: none"> - Wird in der Wärmepumpentechnik für Luft- Wasserwärmepumpen eingesetzt - Tiefes Druckverhältnis bei hohen Temperaturdifferenzen $t_c - t_0$

5.3.3 Gründe für die Wahl von R134a in Gerzensee

Wie in vorstehenden Kapiteln über die Planung von Wärmepumpenanlagen beschrieben wurde, bestimmt die Anlage die notwendige Vorlauftemperatur der Wärmepumpe und die Vorlauftemperatur bestimmt das Kältemittel.

In Gerzensee stellte die vorhandene Anlage folgende Anforderungen an die Wärmeerzeugung:

1. Die Wärmeverteilung besteht zum Teil aus Heizkörpergruppen, die mit Vorlauftemperaturen von über 50°C betrieben werden mussten.
2. Die Anlage besteht aus mehreren Unterstationen, was eine Überlagerung der Vorlauftemperaturen um ca. 5°C erforderlich machte. Wenn eine Heizgruppe 38°C verlangte, musste die Wärmepumpe bereits 43°C liefern.
3. In der Unterstation für die Unterkünfte musste Warmwasser ohne örtliche Nachheizung produziert werden. Um eine Warmwassertemperatur von 53°C erreichen zu können, musste die Wärmepumpe Vorlauftemperaturen von über 60°C liefern.

Die Auswertung der Temperaturen am Kondensatoraustritt T3 und T4 ergab, dass die Wärmepumpen auch in der Übergangszeit Vorlauftemperaturen von über 40°C liefern mussten. Im Sommer stiegen die Tagesmittelwerte der Vorlauftemperaturen auf Werte von bis zu 67°C.

Diese Werte kann neben Propan nur das Kältemittel R134a liefern. Andere Kältemittel hätten zu vermehrtem Einsatz des Zusatzheizkessels geführt oder die Installation von Elektroheizeinsätzen in den Boilern notwendig gemacht.

5.3.4 Betriebs- und Anlaufströme von R134a

Das Kältemittel R134a hat neben einem etwas tieferen COP- Wert einen weiteren Nachteil. Die Betriebs- und Anlaufströme sind etwa doppelt so hoch wie bei R407C oder R410a. Dies führte in den letzten Jahren vermehrt zu Problemen bei der Bewilligung des Anschlusses durch die Elektrizitätswerke. Zum Teil bestimmte das EW die Wahl des Kältemittels, die Hydraulik und das Warmwasserladekonzept mussten angepasst werden.

Warum hat R134a höhere Anlaufströme als die anderen Kältemittel? Im folgender Tabelle sind Kompressorauslegungen für die Kältemittel R134a, R407C und R410a bei gleichen Betriebsbedingungen aufgeführt:

Betriebsbedingungen:	Verdampfungstemperatur	-6°C
	Kondensationstemperatur	51°C
	Flüssigkeitsunterkühlung	4 K
	Sauggasüberhitzung	5 K
	Kompressorfabrikate	Copeland

Tabelle 11: Anlauf- und Betriebsströme verschiedener Kältemittel

	R134a	R407c	R410A
Heizleistung 20 kW			
Kompressor	ZR16M3E-TWD	ZR11M3E-TWD	ZP103KCE-TFD
Verflüssigerleistung	20.50 kW	21.10 kW	21.10 kW
Kälteleistung	14.30 kW	14.80 kW	15.00 kW
Leistungsaufnahme	7.20 kW	7.30 kW	7.35 kW
EER	1.99	2.02	2.05
COP	2.85	2.89	2.87
Stromaufnahme	15.4 A	14.7 A	13.0 A
Max. Betriebsstrom	27.0 A	20.0 A	21.0 A
Anlaufstrom	167.0 A	123.0 A	111.0 A
Hubvolumen Kompressor	35.54 m ³ /h	25.06 m ³ /h	16.76 m ³ /h
Heizleistung 14 kW			
Kompressor	ZR11M3E-TWD	ZR72KCE-TFD	ZP67KCE-TFD
Verflüssigerleistung	14.40 kW	14.30 kW	13.60 kW
Kälteleistung	10.05 kW	10.00 kW	9.55 kW
Leistungsaufnahme	5.05 kW	4.99 kW	4.82 kW
EER	1.98	2.01	1.98
COP	2.85	2.87	2.82
Stromaufnahme	11.0 A	8.8 A	8.5 A
Max. Betriebsstrom	20.0 A	12.1 A	12.2 A
Anlaufstrom	123.0 A	74.0 A	74.0 A
Hubvolumen Kompressor	25.06 m ³ /h	17.00 m ³ /h	10.96 m ³ /h

R134a besitzt eine kleinere volumetrische Kälteleistung als R407C und R410A. Das bedeutet, dass für die gleiche Heizleistung ein Kompressor gewählt werden muss, der mehr m³/h Kaltgase ansaugen kann als dies bei den anderen Kältemitteln der Fall ist. In obiger Tabelle erbringt mit R407C der Kompressor ZR11M3E-TWD eine Heizleistung von 21.1 kW. Mit R134a nur 14.4 kW. R410A benötigt noch einmal kleinere Kompressoren, weil die volumetrische Kälteleistung von den drei Kältemitteln am grössten ist.

Für R134a ist somit für die gleichen Leistungen immer ein gröserer Kompressor mit entsprechend stärkerem Elektromotor und somit auch grösseren Anlauf- und Betriebsströmen notwendig. Auf die

COP-Werte hat diese Tatsache keinen Einfluss.

Für R134a und R407C können die gleichen Kompressortypen verwendet werden. Für R410A sind Kompressoren mit höherem Nenndruck notwendig. Die Hochdruckpressostaten werden bei diesen Geräten auf 42.5 bar eingestellt.

6. Beurteilung der Ergebnisse

In diesem Teil des Schlussberichts werden die Ergebnisse aus den Kapiteln 4 und 5 zusammengefasst und beurteilt.

6.1 Nachweis der Energieeffizienz

6.1.1 Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Als erstes wurde überprüft, wie sich der Endenergieverbrauch im Vergleich zur alten Anlage und zur konventionellen Vergleichsanlage entwickelt hat.

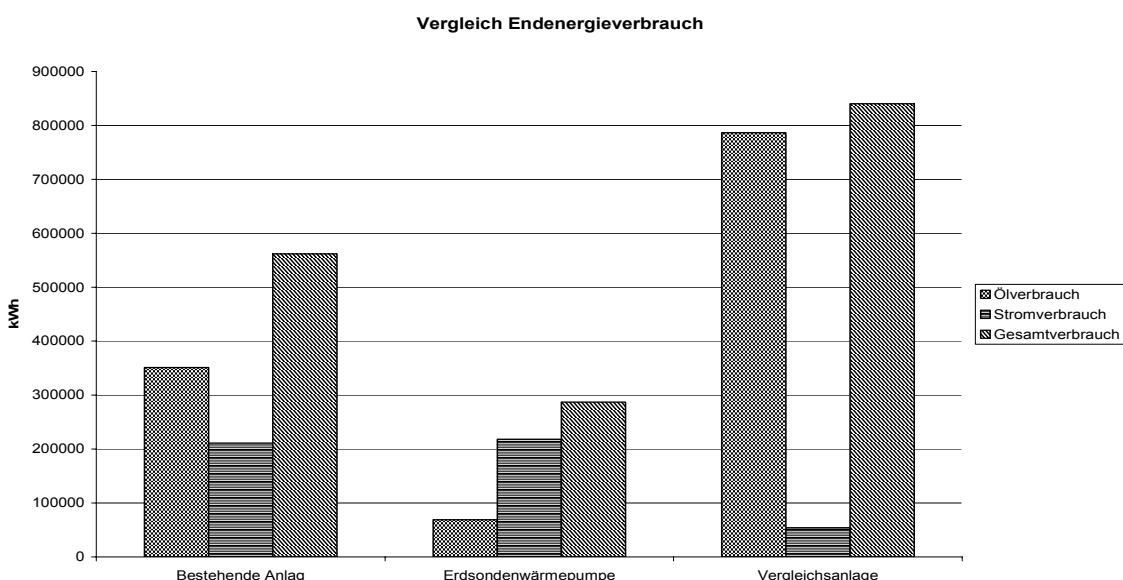


Bild 17: Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Der Ölverbrauch konnte gegenüber der alten Anlage um 80% gesenkt werden. Der Stromverbrauch stieg leicht um 3%. Die Einsparung an Endenergie betrug 49%. Damit konnten die Werte vom Zwischenbericht, die auf Hochrechnungen beruhten, nicht ganz bestätigt werden. Trotzdem sind diese Werte beachtlich, vor allem im Vergleich mit einer konventionellen Ölheizung. Die Wärmepumpenanlage benötigt nur etwa einen Drittelpart der Endenergie der Vergleichsanlage. Die Arbeitszahlen der Wärmepumpenanlage sind mit 2.29 gegenüber den alten Luft-Wasserwärmepumpen mit 1.17 deutlich gestiegen. Sie sind jedoch deutlich tiefer als die COP-Jahreswerte der Wärmepumpe, die 3.31 für Maschine 1 und 3.54 für Wärmepumpe 2 erreichten. Neben dem Anteil des Ölheizkessels ist der hohe Stromverbrauch für die Umwälzpumpen und andere Hilfsantriebe in der Zentrale verantwortlich. 24.7% des totalen Stromverbrauchs der Energiezentrale wurden nicht für den Antrieb der Wärmepumpen benötigt.

6.1.2 Kontrolle einzelner Anlageteile

6.1.2.1 COP und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen

1. COP- Werte

Die COP- Werte der beiden Wärmepumpen liegen gemäss nachstehender Aufstellung im Bereich der Herstellangaben. Die Werte wurden aus den Diagrammen mit den COP-Werten pro Tag ermittelt.

Herstellerangaben:

Betriebstemperaturen	B0W35 COP = 4.1
	B0W50 COP = 3.1

Gemessene Werte

Jahr 1	WP1	WP2
	B8W45 COP = 3.41	B8W45 COP = 3.69
	B8W50 COP = 3.18	B8W50 COP = 3.52
	B8W63 COP = 2.56	B8W63 COP = 3.02
Jahr 2	WP1	WP2
	B8W45 COP = 3.51	B8W45 COP = 3.61
	B8W50 COP = 3.33	B8W50 COP = 3.42
	B8W63 COP = 2.83	B8W63 COP = 2.95

Im ersten Messjahr lagen die COP- Werte von Wärmepumpe 1 noch deutlich unter denjenigen von Wärmepumpe 2. Nach den Erkenntnissen im Zwischenbericht kontrollierte der Hersteller Wärmepumpe 1 mit dem Ergebnis, dass die Differenz zwischen den beiden Maschinen im zweiten Messjahr deutlich kleiner geworden ist.

Die Jahresarbeitszahlen liegen mit 3.25 und 3.38 für Wärmepumpe 1 sowie 3.53 und 3.54 für Wärmepumpe 2 ebenfalls im erwarteten Bereich. Die Monatsmittelwerte der Kondensatoraustrittstemperaturen lagen in den meisten Monaten zwischen 45°C und 50°C.

2. Jahresarbeitszahlen

Im Gegensatz zu den COP- Werten werden bei der Berechnung der Jahresarbeitszahlen noch der Stromverbrauch für die Sole- und die Kondensatorpumpen berücksichtigt. Die Jahresarbeitszahl ist daher massgebend für die Bestimmung des Endenergieverbrauchs einer Anlage.

Jahresarbeitszahl Wärmepumpe 1	2.94
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe 2	3.10

Für Minergienachweise werden folgende Arbeitszahlen für Wärmepumpen mit Erdwärmesonden zugelassen:

Wärmepumpe nur für Raumheizung	3.10
Wärmepumpe mit ganzjähriger Warmwassererwärmung	2.70

Die Berechnung der Jahresarbeitszahlen beruhen zum Teil auf Schätzungen. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass die Wärmepumpen dem heutigen Stand der Technik entsprechen.

6.1.2.2 Deckungsgrad der Wärmepumpen

Das zweite Ziel der Sanierung, den Anteil des Ölheizkessels an der Energieproduktion möglichst zu verkleinern, wurde ebenfalls erreicht. Der im Zwischenbericht angestrebte Deckungsgrad von 95% für das zweite Messjahr konnte nicht ganz erreicht werden.

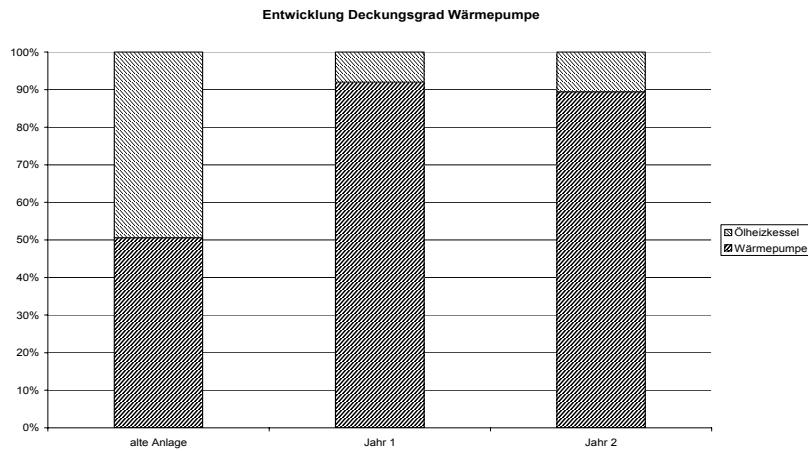


Bild 18: Entwicklung des Wärmepumpendeckungsgrades

Je nach Witterung wurden sehr unterschiedliche Deckungsgrade erreicht:

Sommerbetrieb: Die Deckungsgrade waren in dieser Periode mit Werten zwischen 63-88% am tiefsten. Da kaum Heizenergie benötigt wurde, fiel die wöchentliche Hochladung der Boiler auf 63° wegen den Legionellen stärker ins Gewicht. Zudem führte die Trägheit der Anlage dazu, dass die Wärmepumpe in der vorgegebenen Zeit die Sollwerte nicht erreichen konnte und der Ölheizkessel zugeschaltet wurde.

Übergangszeit, Winter 03/04: In der Übergangszeit und im milden Winter 03/04 wurden mit 91-96% die besten Deckungsgrade erreicht.

Kälteperioden Januar bis Anfangs März 2005: Ab Anfang Januar bis Mitte März 2005 mit den längeren Kälteperioden kam der Ölheizkessel ungewöhnlich oft zum Einsatz. Der Wärmeleistungsbedarf für Raumheizung, Lüftungsanlagen und Warmwasserbereitung übertraf mit Werten bis zu 300 kW die maximale Wärmepumpenleistung von 240 kW. Die Zusatzheizung war notwendig. Die Deckungsgrade waren während dieser Zeit mit 86–91% auch wesentlich tiefer als bei wärmerer Witterung.

6.2 Kostenvergleich zu einer reinen Ölheizung

In Kapitel 4.2 wurden die Investitions- und Betriebskosten der Anlage in Gerzensee den Kosten für eine reine Ölheizungsanlage gegenübergestellt.

Tabelle 12: Investitions- und Betriebskosten der Wärmepumpen- und Vergleichsanlage

Kostenvergleich zu konventioneller Ölheizung	Erdsonden-Wärmepumpe	Ölheizung
1. Investitionskosten		
Vorbereitungsarbeiten	22'800.--	27'400.--
Wärmegewinnung, Energielagerung	505'000.--	50'600.--
Wärmeerzeugung	286'000.--	33'600.--
DDC- Regelung	56'600.--	33'500.--
Kühlanlage Mehrzwecksaal	94'800.--	142'900.--
Bauseitige Nebenarbeiten	177'500.--	52'100.--
Total Investitionskosten	1'142'700.--	340'100.--
2. Betriebskosten		
Energiekosten Strom und Öl	30'777.--	64'558.--
Kapitalkosten	78'807.--	25'516.--
Unterhaltskosten	11'480.--	4'555.--
Total Betriebskosten	121'064.--	94'629.--
Nutzenergieverbrauch	656'532 kWh	656'532 kWh
Spezifischer Energiepreis	18.4 Rp/kWh	14.4 Rp/kWh
Vergleich	100%	80.4%

Die Berechnung der Betriebskosten beruhen auf folgenden Grundlagen:

1. Stromkosten für Wärmepumpenanlage Tarif Econom I der BKW
2. Stromkosten für Ölheizung Tarif Modulo classic der BKW
3. Ölpreis Fr. 75.-- pro 100 ltr.
4. Zinssatz 3.5%
5. Kapitalkosten nach Annuitätenmethode

Die Kosten sind mit dem Zins- und Kostenniveau der zweiten Jahreshälfte 2005 berechnet worden. Die Wärmepumpenanlage profitiert vom günstigen Zinsniveau und den hohen Erdölpreisen. Im Zwischenbericht war der spezifische Energiepreis der Ölheizung mit 9.94 Rp/kWh nur etwa halb so teuer wie der Energiepreis der Wärmepumpenanlage mit 18.5 Rp/kWh. Nur 1 ½ Jahre später ist diese Differenz auf 20% geschrumpft.

Gegenüber dem Zwischenbericht wurde neu auch die Kälteanlagen für den Mehrzwecksaal in die Kostenberechnungen übernommen. Der Einfluss auf den spezifischen Energiepreis dieses Anlageteiles ist nicht zuletzt wegen dem kleinen Kühlenergieverbrauch von unter 1'000 kWh im Jahr 1994 gering.

Diese Berechnung zeigt auch, dass die Wärmepumpenanlage dank dem hohen Erdölpreis finanziell interessant geworden ist. Diese Erkenntnis wird vom Boom, den die Wärmepumpenbranche im Jahr 2005 erleben durfte, bestätigt. Die Bohrfirmen für Erdwärmesonden waren auf Monate hinaus ausgebucht und die Hersteller von Wärmepumpen arbeiteten fast Tag und Nacht.

6.3 Betriebliche Erfahrungen

Die Anlage arbeitete ohne grössere Störungen. Ein Problem war und ist der Transport von Kälteöl

zwischen den beiden parallelen Kältekreisen der Wärmepumpen. Der Aufwand für die Bedienung war minimal.

Die Anlage konnte bei verschiedenen Betriebszuständen untersucht werden:

- Warmwasserbereitung im Sommer:
Das Warmwasser musste über die Fernleitungen in zwei separaten Unterstationen aufbereitet werden. Die Wärmepumpe musste dazu auf einem hohen Temperaturniveau von bis zu 67°C arbeiten. Trotzdem kam der Zusatzheizkessel ungewollt oft zum Einsatz. Bei der Planung von grossen Wärmepumpenanlagen ist das Konzept der Brauchwärme - wasseraufbereitung von zentraler Bedeutung.
- Während der Kälteperiode Januar bis Anfangs März zeigte sich die Leistungsgrenze der Wärmepumpenanlage. Der Ölheizkessel kam mehrere Male als Spitzenlastheizkessel zum Einsatz.
- Die Free- Coolinganlage funktionierte erfreulich gut. Der Mehrzwecksaal konnte im Jahr 2004 für Anlässe benutzt werden, die früher wegen den zu hohen Raumtemperaturen undenkbar gewesen wären. Das Sondenfeld lieferte Kälteenergie mit einem konstanten Temperaturniveau von 11 – 12°C. Mit einer maximalen Kälteleistung von 15.0 kW ist das theoretische Kühlleistungspotential der Erdsondenanlage von 96 kW nicht ausgeschöpft. Die Fernleitung ist so ausgelegt worden, dass weitere Verbraucher angeschlossen werden können.

Die Unterhaltskosten sind für die Wärmepumpenanlage fast drei mal so hoch wie für eine reine Ölheizung. Eine regelmässige Wartung der Wärmepumpen ist von zentraler Bedeutung und hilft Störungen zu vermeiden. Weiter wird der Abschluss einer Maschinenbruchversicherung für Wärmepumpen dieser Leistungsklasse dringend empfohlen. Die Kompressoren machen einen grossen Anteil der Kosten der Wärmepumpe aus und haben als elektrischer Bauteil nur ein Jahr Garantie.

Die Lärmemissionen sind mit 75 dB(A), gemessen in 1m Entfernung, trotz Schalldämmgehäuse recht hoch. In Wohnbauten ist daher die Platzierung der Zentrale direkt unter Schlafräumen nicht zu empfehlen. Zudem sollten alle technisch machbaren Schalldämmmassnahmen wie schwimmend gelagerter Sockel, Kompensatoren in den Anschlussleitungen, keine starren Elektrokanäle auf die Wärmepumpe etc. ausgeführt werden.

6.4 Planerische Aspekte

6.4.1 Erdsondenfeld

Wärmepumpen mit Erdwärmesonden als Wärmequelle sollten möglichst genau berechnet werden. Zu gross dimensionierte Anlagen erhöhen die Erstellungskosten massiv. Bei zu knapp ausgelegten Wärmepumpen können im Extremfall die Erdsonden übernutzt und zerstört werden. Defekte Anlagen sind schwierig zu sanieren und müssen meistens stillgelegt werden.

Das Erdsondenfeld in Gerzensee wurde mit etwas Reserve dimensioniert. Sowohl die maximale spezifische Entzugsleistung (41.97 W/m) wie die pro Meter Sonde entzogene Energiemenge (86.82 kWh/ma) blieben untern den Planungswerten von 45 W/m und 100 kWh/ma.

Das Temperaturniveau im Erdsondenkreislauf war recht hoch. Im Sommer lieferte die Anlage mittlere Temperaturwerte von 13.5°C. Im Winter sanken die tiefsten Vorlauftemperaturen vom Sondenfeld auf 4.7°C. Im zweiten Messjahr waren die Soletemperaturen etwas tiefer als im ersten. Der Wärmeeintrag im Sommer 2004 war mit 991 kWh im Verhältnis zum gleichzeitigen Wärmeentzug von 73'850 kWh zu klein, um die Soletemperaturen nachhaltig beeinflussen zu können.

Das Erdsondenfeld erwies sich als zuverlässiger Kältelieferant. Die Kühlung im Mehrzwecksaal konnte mit konstanten Vorlauftemperaturen im Bereich von 11.1 – 12.7°C beliefert werden. Der maximale relative Wärmeeintrag pro Meter Erdsonden betrug 2.31 W/m. Bei höherem spezifischem Wärmeeintrag werden die Soletemperaturen ansteigen. Lüftkühler sollten für Soletemperaturen 16/20°C ausgelegt werden.

Im Winter sank die Vorlauftemperatur der Erdsonden kontinuierlich von 9.1 auf 6.0°C ab. Ab März erholten sich die Temperaturen wieder. Die Temperaturen reagierten sehr rasch auf Leistungsspitzen der Wärmepumpen. Innerhalb von 1 bis 2 Stunden sank die Temperatur bei Vollast um 2°C ab. Bei schwächerer Belastung während des Tages und vor allem beim Absenkbetrieb nach 22 Uhr erholten sich die Temperaturen wieder. Bei Erdsondenwärmepumpen ist daher ein Betrieb mit voller Leistung während mehrerer Tage unbedingt zu vermeiden.

6.4.2 Planung von Grosswärmepumpen

Die Planung von Grosswärmepumpen geschieht nach den gleichen Kriterien, die auch bei der Auslegung von kleineren Einheiten beachtet werden sollten. Der wichtige Unterschied ist der, dass Fehler oder Unterlassungen, die bei kleineren Anlagen ohne negative Auswirkungen bleiben, bei Grosswärmepumpen mit Sicherheit Probleme bereiten werden.

Daher sollten folgende Abklärungen seriös ausgeführt werden:

1. Abklärungen für Erdsondenbohrungen
 - Vorabklärung der Bohrbewilligung bei den kantonalen Behörden.
 - Ist notwendiger Platz für das Sondenfeld vorhanden?
 - Wo verlaufen die Werkleitungen?
 - Wo können die Sondenverteiler platziert werden?
 - Bohrschlammensorgung in Kostenschätzungen nicht vergessen.
2. Elektrischer Anschluss
 - Abklären der Anschlussmöglichkeit beim zuständigen EW. In Gerzensee waren Anlaufströme von 419A zu bewältigen.
 - Ist die Hausanschlussleitung gross genug?
 - Für die Kosten der elektrischen Anschlüsse frühzeitig Elektroplaner beiziehen.
 - Separate Kabeltrasse für Leistungsstrom 3x400V, Steuerleitungen 230V und Schwachstromleitungen 24V vorsehen.
3. Bauliche Vorkehrungen
 - Platzbedarf für Wärmepumpen und Pufferspeicher in den Energiezentralen.
 - Schalltechnische Vorabklärungen.
 - Einbringen der Wärmepumpen und Speicher bei Sanierungen.
4. Sauberes Anlagekonzept mit dem erforderlichen Temperaturniveau der Verbraucher.
 - Bestehende Heizgruppen mit hoher Vorlauftemperatur vorhanden?
 - Wird Warmwasser mit der Wärmepumpe aufbereitet und wie?
 - Sind grosse Fernleitungsnetze vorhanden.
 - Je nach Ergebnis der hydraulischen Vorabklärungen ist mit dem Wärmepumpenlieferanten die Wahl des Kältemittels und der Regulierung abzustimmen.

6.4.3 Wahl des Kältemittels

In den letzten Jahren haben sich Probleme mit dem Anschluss von Wärmepumpen an das elektrische Netz gehäuft (Erfahrung des Verfassers). Vor allem mit dem Kältemittel R134a sind

wegen den hohen Anlauf- und Betriebsströmen die Bewilligung verweigert worden.

Das Kältemittel R134a muss wegen seiner kleineren volumetrischen Kälteleistung für ca. 20 kW Heizleistung 35.54 m³/h Kaltgase ansaugen. R407C muss für die gleiche Leistung nur 25.06 m³/h und R410A sogar nur 16.76 m³/h Kältemittel umwälzen. Daher sind für R134a grössere Kompressoren mit entsprechend höheren Anlauf- und Betriebsströmen notwendig.

In vorstehendem Kapitel ist der Zusammenhang zwischen Anlagekonzept und der Wahl des Kältemittels erläutert worden. Je nach vorhandenen Heizgruppen bei Anlagesanierungen oder bei der Aufbereitung von Warmwasser über Fernleitungsnetze sind höhere Vorlauftemperaturen notwendig. In nachstehender Aufstellung sind die momentan in der Wärmepumpentechnologie am häufigsten eingesetzten Kältemittel mit ihren Einsatzgrenzen aufgeführt.

R134a	<ul style="list-style-type: none"> - Einstoffkältemittel - max. Vorlauftemperaturen 60 – 65°C - im Vergleich zu anderen Kältemitteln hohe Anlauf und Betriebsströme - COP- Werte etwas tiefer als bei anderen Kältemitteln - Benötigt spezielle Kältemittelöle
R407C	<ul style="list-style-type: none"> - Gemisch aus HFKW – Kältemitteln, unter anderen mit R134a - max. Vorlauftemperaturen 50 – 55°C - hoher Temperaturlgleit (angepasste Anlagetechnik, Nachteile bei Effizienz der Wärmetauscher) - COP- Werte ca. 13% höher als bei R134a
R410A	<ul style="list-style-type: none"> - nahe-azeotrope Kältemittelmischung (bei einem bestimmten Mischungsverhältnis kein Temperaturlgleit) - max. Vorlauftemperaturen 55 – 60°C - Sehr gute physikalische Eigenschaften (volumetrische Kälteleistung, extrem gute Wärmeübertragskoeffizienten in Wärmetausichern) - Sehr hohe Kondensationsdrücke (über 42 bar bei $t_c = 60^\circ\text{C}$) erfordern spezielle Kompressoren und Wärmetauscher. - Anlagekomponenten serienmäßig bis 50 kW thermischer Leistung vorhanden. - COP- Werte ca. 35% höher als bei R134a
R404A	<ul style="list-style-type: none"> - Gemisch aus HFKW – Komponenten - max. Vorlauftemperaturen 55°C - Temperaturlgleit dank ähnlichen Siedepunkten der Basisstoffe < 1K - Tiefes Druckverhältnis bei hohen Differenzen zwischen Verdampfungs- und Kondensationstemperatur. Daher Verwendung bei Luft- Wasserwärmepumpen. - COP- Werte etwa gleich wie bei R134a.
R290	<ul style="list-style-type: none"> - Propan, natürliches Kältemittel - max. Vorlauftemperaturen 60 – 65°C - Wegen Explosionsgefahr von Propan bei Innenaufstellung nur mit speziellen Sicherheitsvorkehrungen erlaubt. - COP- Werte ca. 7% besser als bei R134a

Neben vorstehenden Kältemitteln wird für grössere Einheiten R717 (Ammoniak) eingesetzt. Beim Einsatz dieses Kältemittels sind neben den mit ca. 50 – 55°C tiefen Vorlauftemperaturen auch die toxischen Nebenwirkungen bei Kältemittelverlusten zu beachten. Zeitungsberichte über umfangreiche Evakuierungen von Schulen, Eisbahnen etc. sind leider häufig.

Für Sanierungen werden seit einigen Jahren Wärmepumpen mit Kompressoren, die im höheren Temperaturbereich über eine Dampf - Zwischeneinspritzung verfügen, angeboten. Diese erreichen mit dem Kältemittel R407C Vorlauftemperaturen bis 65°C. Diese Maschinen stehen momentan nur bis zu einer thermischen Leistung von ca. 10 - 15 kW zur Verfügung.

In der Wärmepumpentechnologie hat in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung stattgefunden, die auch in Zukunft neue Erkenntnisse und Technologien bringen wird. Vorstehende Aussagen werden morgen schon als überholt gelten.

7. Symbolverzeichnis

7.1 Messeinrichtung

Q1	Wärmeabgabe Wärmepumpe 1	= Q_{WP1}
Q2	Wärmeabgabe Wärmepumpe 2	= Q_{WP2}
Q3	Wärmeabgabe Ölheizkessel	= $Q_{Öl}$ WP- Anlage
Q4	Nutzenergie Warmwasser, Lüftungsanlagen	= $QN_{BW, Lüftung}$
Q5	Nutzenergie Raumheizung	= $QN_{Heizung}$
Q6	Kälteenergie Wärmepumpe 2	= $Q_0 WP2$
Q7	Kälteenergie Wärmepumpe 1	= $Q_0 WP1$
Q8	Kühlenergie Mehrzwecksaal	= $Q_0 MZS$
E1	Stromaufnahme Wärmepumpe 1	= E_{WP1}
E2	Stromaufnahme Wärmepumpe 2	= E_{WP2}
B1	Ölzähler vor Brenner	= $B_{Öl}$
T1	Vorlauftemperatur vom Erdsondenfeld	
T2	Rücklauftemperatur zum Erdsondenfeld	
T3	Vorlauftemperatur Wärmepumpe 1	
T4	Vorlauftemperatur Wärmepumpe 2	
T5	Aussentemperatur	

7.2 Formelzeichen

COP_{WP1}	Leistungszahl Wärmepumpe 1	-
COP_{WP2}	Leistungszahl Wärmepumpe 2	-
$B_{Öl}$	Ölverbrauch Heizkessel	ltr
$E_{vergleichsanlage}$	Endenergieverbrauch der Vergleichsanlage	kWh
$E_{Pumpen, Brenner}$	Stromverbrauch für Umwälzpumpen, Brenner in der Heizzentrale	kWh
$E_{Pu WP}$	Stromverbrauch Sole- und Kondensatorpumpen	kWh
$E_{Kühlung}$	Stromverbrauch des Kaltwassersatzes der Vergleichsanlage	kWh
$E_{Hauptzähler}$	Stromverbrauch für Energiezentrale gemäss Hauptzähler der BKW Energie AG Nr. 483642	kWh
E_{WP1}	Stromverbrauch für Wärmepumpe 1 gemäss Unterzähler	kWh
$E_{WP1 (1+2)}$	Mittelwert beider Jahre für Stromverbrauch WP1	kWh
E_{WP2}	Stromverbrauch für Wärmepumpe 2 gemäss Unterzähler	kWh
$E_{WP2 (1+2)}$	Mittelwert beider Jahre für Stromverbrauch WP2	kWh
$E_{alte Anlage}$	Stromverbrauch der alten Anlage	kWh
EER	Leistungszahl des Kaltwassersatzes	-
H_u	Heizwert von Erdöl	kWh/ltr
K_{kWh}	Kosten pro kWh bezogener Nutzwärme	Fr./kWh
$K_{Betrieb}$	Betriebskosten der Anlage	Fr./a
LS	Länge der Erdwärmesonden	m
$QN_{BW, Lüftung}$	Nutzenergieverbrauch für Warmwasser und Lüftungsanlagen	kWh
$QN_{BW, Lüftung 1+2}$	Nutzenergieverbrauch BW/ Lüftung, Mittelwert beider Jahre	kWh
$QN_{Heizung}$	Nutzenergieverbrauch für Raumheizung	kWh
$QN_{Heizung 1+2}$	Nutzenergieverbrauch für Raumheizung, Mittelwert beider Jahre	kWh
$Q_0 MZS$	Kühlenergie für Mehrzwecksaal	kWh
$Q_0 WP$	Kälteleistung der Wärmepumpe	kW
$Q_h WP$	Heizleistung der Wärmepumpe	kW
Q_{WP1}	Wärmeabgabe Wärmepumpe 1 am Kondensator	kWh

$Q_{WP1 \ (1+2)}$	Mittelwert beider Jahre der Wärmeabgabe am Kondensator Wärmepumpe 1	kWh
Q_{WP2}	Wärmeabgabe Wärmepumpe 2 am Kondensator	kWh
$Q_{WP2 \ (1+2)}$	Mittelwert beider Jahre der Wärmeabgabe am Kondensator Wärmepumpe 2	kWh
$Q_{Öl}$ alte Anlage	Ölenergie der alten Anlage	kWh
$Q_{Öl \ WP- \ Anlage}$	Ölenergie der Wärmepumpenanlage	kWh
$Q_{Öl \ Vergleichsanlage}$	Ölenergie der Vergleichsanlage	kWh
$Q_{soll \ WP}$	Sollleistung der Wärmepumpe	kW
$Q_{SIA \ 384/2}$	Wärmeleistungsbedarf gemäss SIA 384/2	kW
Q_{BW}	Leistungsreserve für Warmwasserbereitung	kW
Q_a Sonden	Spezifischer Wärmeentzug pro m Sonden und Jahr	kWh/ma
$Q_a \ RH$	Wärmebedarf für Raumheizung pro Jahr	kWh/a
$Q_a \ BW$	Wärmebedarf für Warmwasserbereitung pro Jahr	kWh/a
$q_{spez.}$	Spezifische Entzugsleistung der Erdwärmesonden	W/m
S_{WP}	Deckungsgrad der Wärmepumpe	-
V_{BW}	Warmwasserverbrauch pro Tag	ltr à 60°C
$\beta_{J \ WP1}$	Jahresarbeitszahl Wärmepumpe 1	-
$\beta_{J \ WP2}$	Jahresarbeitszahl Wärmepumpe 2	-
$\varepsilon_{Öl}$	Nutzungsgrad des Ölheizkessels	-
$\varepsilon_{alte. \ Anlage}$	Jahresnutzungsgrad der alten Anlage	-
$\varepsilon_{WP- \ Anlage}$	Jahresnutzungsgrad der Erdsondenwärmepumpe	-
$\varepsilon_{Vergleichsanlage}$	Jahresnutzungsgrad der Vergleichsanlage	-

8. Anhang

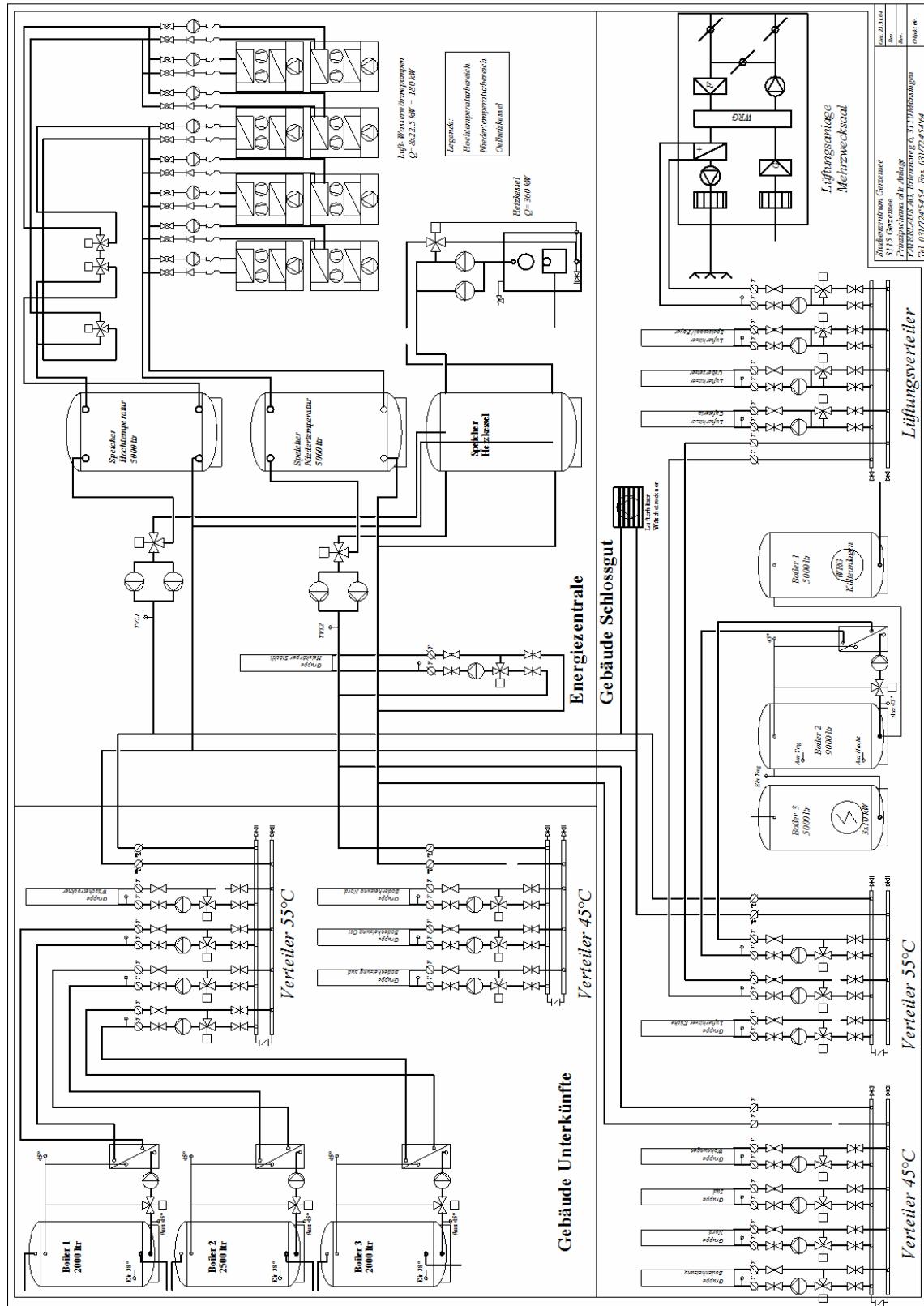


Bild 19: Prinzipschema der alten Anlage

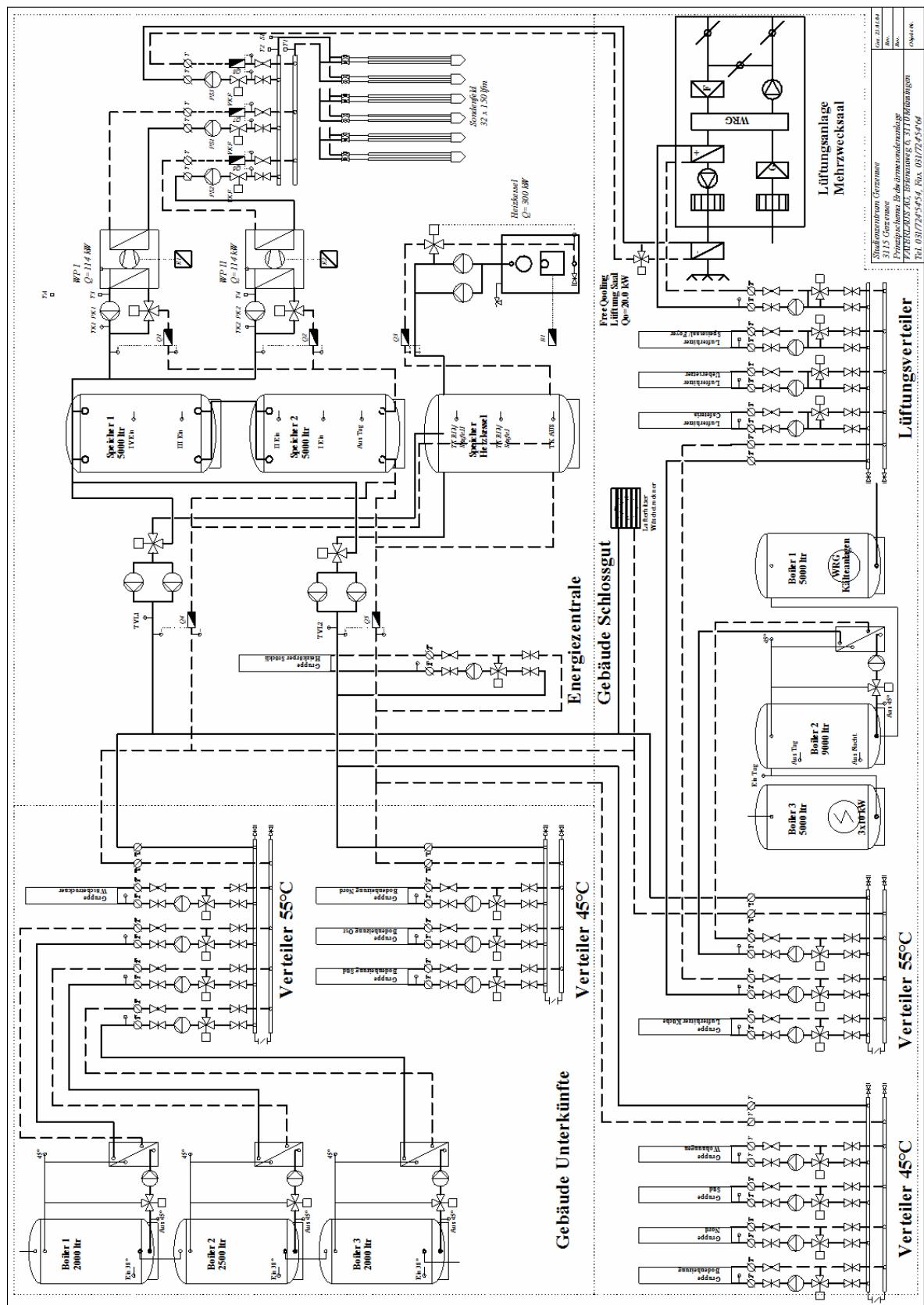


Bild 20: Prinzipschema der neuen Anlage