

EF Nr. 230 773

Schlussbericht Juli 2003

Erdwärmesonden- Wärmepumpenanlage Eggmatt in Mühlethurnen

Betrieboptimierung

ausgearbeitet durch
Beat Nussbaumer
Dr.Eicher&Pauli AG
Zinggstrasse 1, 3007 Bern

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

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
2. Récapitulatif	4
3. Summary	5
4. Ausgangslage und Zielsetzung	6
4.2 Zielsetzung	8
5. Grundlagen	9
6. Lösungsweg	10
6.1 Ablesungen	10
6.2 Dynamische Messung	11
6.3 Simulation Erdreich	11
7. Betriebsanalyse	12
7.1 Energiebilanz	12
7.2 WP-Betrieb	13
7.3 Solarer Bruttowärmeertrag	15
7.4 Erdsonden	16
7.5 Begleitheizung	18
8. Optimierung	19
8.1 Solare Regenerierung	19
8.2 Solare WW-Vorwärmung	21
8.3 Unterkühler	24
9. Weiteres Vorgehen	25
10. Anhang	26

© Copyright

Bundesamt für Energie, 3003 Bern
Vervielfältigung auszugsweise oder des gesamten Inhaltes
nur unter Quellenangabe erlaubt.

Impressum

Verfasser: Beat Nussbaumer
Projektnummer: 00.3.016
Telefon: 031 370 14 01
E-Mail: beat.nussbaumer@eicher-pauli.ch
Mitautor: Stefan Lanz
Stand: 15.07.2003 16:01

1. Zusammenfassung

Die Wärmeversorgung der fünf Reihenhäuser der Diane-Ökobau Siedlung Eggmatt in Mühleturnen (BE) erfolgt mit einer Erdsonden-Wärmepumpe. Der Heizleistungsbedarf beträgt 86 kW. Das ursprüngliche Erdsondenfeld wurde sehr klein ausgelegt und sollte sich über eine Aufladung mittels Solarkollektoren regenerieren.

Reihensiedlung mit zentraler Erdsonden-WP, Regenerierung über Kollektoren

Wegen der Unterkühlung des Sondenfeldes konnte die Wärmepumpe nur noch auf Teillast betrieben werden. Die fehlende Wärmeleistung wurde durch Cheminéeöfen erbracht.

Betriebsanalyse

Die vorgenommene Analyse des Anlagebetriebes anhand umfangreicher Messungen führte zu folgenden Erkenntnissen:

- A. Eine Erweiterung des Erdsondenfeldes war unumgänglich und führte zu einer markanten Verbesserung der Jahresarbeitszahl.
- B. Die sommerliche Aufladung des Erdsondenfeldes kann den Winterbetrieb nicht positiv beeinflussen, der Betrieb der Kollektoren im Winter führt zu einer Einsparung von höchstens Fr. 140.- pro Jahr.
- C. Die Begleitheizung führte durch Kurzschlüsse und fehlerhafte Einstellungen zu einem hohen Elektrobedarf und einer ungenügenden WW-Versorgung.
- D. Der Unterkühler hatte wegen starker Verkalkung keine Wirkung.

Schlussfolgerung

Die (Solar-)Wärmezufuhr führt primär zu einer Erhöhung der Quellen-temperatur. Pro 1 Kelvin höherer Quellentemperatur resultiert eine Anhebung der Leistungszahl um rund 2%. Dies ist im Vergleich mit einer solaren Aufladung über eine Erweiterung der Erdwärmesonden effizienter und kostengünstiger zu erreichen. Zudem ist die saisonale Wärme-speicherung mit vielen Unsicherheiten verbunden.

Solare Erdsonden-Regenerierung ist ineffizient und mit grossen Unsicherheiten verbunden

Empfehlung

Die Untersuchung verschiedener Lösungsoptionen führte anhand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu folgender Vorgehensempfehlung:

Sofort

1. Ausschalten der solaren Erdsonden-Ladung
2. Entkalkung des Unterkühlers
3. Weiterführung der Energiebuchhaltung

Keine solare Aufladung im Sommer

Bis 2010

4. Teilersatz der Kollektoren mit verglasten Typen und Einsatz eines Solarspeichers zur zentralen solaren WW-Erzeugung.
5. Ersatz R22 durch anderes Kältemittel

Solare, zentrale WW-Erzeugung

R22 Ersatz

2. Récapitulatif

L'alimentation en chaleur des cinq maisons alignées du lotissement Eggmatt à Mühleturnen (BE) s'effectue avec une thermopompe à sonde terrestre. Les besoins en puissance calorifique sont de 86 kW. Le champ d'origine de la sonde terrestre a été conçu très petit et devrait se régénérer par recharge par capteurs solaires.

En raison du sous-refroidissement du champ de sonde, la thermopompe ne peut être exploitée que pour une charge partielle. La puissance thermique manquante a été fournie par des fours à cheminée.

Lotissement de maisons alignées avec thermopompe centrale à sonde terrestre, régénération par capteurs

Analyse d'exploitation

L'analyse effectuée de l'exploitation de l'installation à l'aide de nombreuses mesures a abouti aux résultats suivants:

- A. Une extension du champ de sonde terrestre était indispensable et a entraîné une amélioration significative du coefficient de travail annuel.
- B. Le recharge en été du champ de sonde terrestre ne peut pas avoir une influence positive sur le fonctionnement en hiver, et l'exploitation des capteurs en hiver entraîne une économie maximale de 140 Francs par an.
- C. Le chauffage d'accompagnement a entraîné du fait des courts-circuits et de réglages défectueux des besoins en électricité importants et un approvisionnement insuffisant en eau chaude.
- D. Le sous-refroidisseur n'a pas eu d'effet en raison d'un entartrage important.

Conclusion

L'apport de chaleur (solaire) entraîne d'abord une augmentation de la température de la source. Pour 1 Kelvin de température de source supérieure, on obtient une augmentation du coefficient de puissance d'environ 2 %. Ce résultat peut être obtenu de façon plus efficace et plus avantageuse avec un recharge solaire par une extension des sondes géothermiques. En outre, le stockage de chaleur saisonnier entraîne de nombreuses incertitudes.

La régénération solaire des sondes terrestres est inefficace et entraîne de grandes incertitudes.

Conseils

L'étude de différentes options de solution a abouti aux conseils suivants en matière de procédé à l'aide d'un examen de la rentabilité :

Mesures Immédiates

1. Déconnexion du chargement solaire / sonde terrestre
2. Détartrage du sous-refroidisseur
3. Poursuite de la comptabilisation de l'énergie

Pas de recharge solaire en été

Mesures d'ici 2010

4. Remplacement partiel des capteurs avec des modèles placés sous verre et utilisation d'un accumulateur solaire pour la production solaire centralisée d'eau chaude.
5. Remplacement R22 par autre agent réfrigérant.

Production solaire centralisée d'eau chaude

Remplacement R22

3. Summary

The five row, or terrace houses of the Diane-Ökobau Siedlung Eggmatt (Diane Eco-Construction, Eggmatt housing estate) in Mühleturnen (BE) are supplied with heat from an earth sensor heat pump. The heat output requirement is 86 kW. The original earth sensor field configuration was very small and designed to be regenerated by a boost from solar collectors.

Row houses with centralised earth sensor heat pump, regeneration via collectors

Due to the supercooling of the sensor field it was only possible to operate the heat pump under partial load conditions. The heat output shortfall was made up by slow combustion stoves.

Operating analysis

The system operating analysis based on extensive measurements yielded the following findings:

- A. An extension to the earth sensor field was unavoidable and resulted in a striking improvement to the annual thermal equivalent.
- B. The summertime charging of the earth sensor field is unable positively to influence the winter operation; the operation of the collectors in the winter yielded a maximum saving of Fr. 140.- per year.
- C. The backup heating led to short circuits and faulty settings resulted in a high electrical power consumption and unsatisfactory WW supply.
- D. Due to heavy lime formation the super cooler had no influence.

Conclusion

The (solar) heat supply resulted primarily in an increased source temperature. Every 1 kelvin increase in source temperature yielded an increase in the performance characteristic of some 2%. Compared to a solar charge, this can be achieved more efficiently and cost-effectively via an extension to the earth heat sensors. In addition, the seasonal heat storage is extremely uncertain and unreliable.

Solar earth sensor regeneration is inefficient and extremely unreliable

Recommendation

An examination of the various optional solutions on the basis of a profitability analysis resulted in the following recommendation:

Immediate

1. Switching off the solar earth sensor charging
2. Deliming of the supercooler
3. Continuation of the energy accounting

No solar charging in summer

Up to 2010

4. Partial replacement of the collectors by the glazed types and introduction of a solar storage for the central solar WW generation.
5. Replace R22 for a different coolant

Solar, centralised WW generation

R22 replacement

4. Ausgangslage und Zielsetzung

KONZEPT WÄRMEERZEUGUNG

Die Erstellung der Diane-Ökobau Siedlung Eggmatt in Mühleturnen (BE) erfolgte in Etappen. Mit dem Endausbau werden seit 1995 die fünf Reihenhäuser mit einem totalen Heizleistungsbedarf von 86 kW bei $T_{\text{ausl.}} = -8^\circ\text{C}$ über eine Erdsonden-Wärmepumpe beheizt.

Etappierter Ausbau einer
Reihensiedlung mit Erd-
sonden-Wärmepumpe



Bild 1

Das Erdsondenfeld bestand bei der Realisierung aus sieben Koaxial-Sonden (7 x 100 m), eine parallel eingebundene Solaranlage mit unverglasten Kollektoren (87 m²) soll das Erdreich aufladen. Die Warmwasseraufbereitung erfolgt zentral (2 x 800 Liter), die Zirkulationsverluste sind über eine elektrische Begleitheizung abgedeckt.

Regenerierung des Erd-
sondenfeldes über Kol-
lektoren

ERSTE BETRIEBSPHASE

Die äusserst knappe Auslegung des Sondenfeldes (rund 100 W_{kälte}/Lfm) führte zu sehr tiefen Sondentemperaturen um -6°C und einer starken Vereisung der Erschliessungsleitungen (Anhebung Terrain). Weil die notwendigen Wärmezähler fehlten, waren Aussagen über die Anlageeffizienz nicht möglich. Es wurde vermutet, dass kein nutzbarer Wärmeeintrag über die Solaranlage erfolgt.

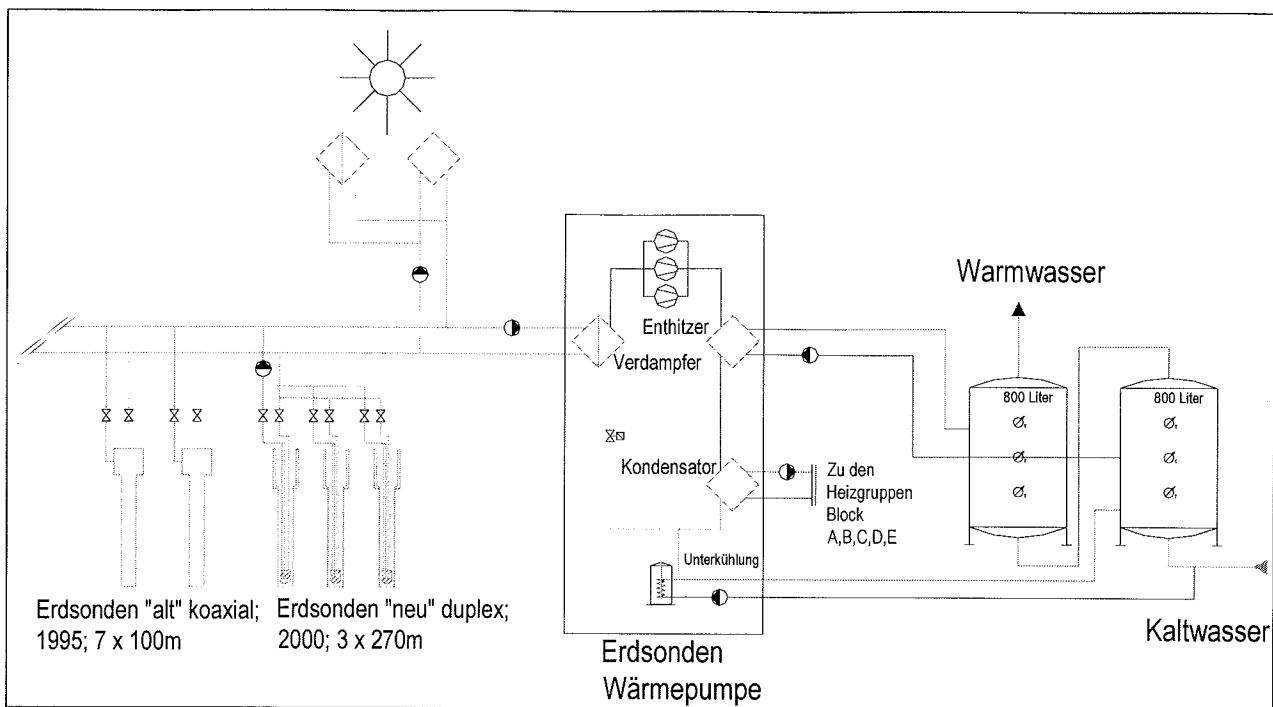
Problematischer Betrieb
wegen knapper Ausle-
gung der Erdsonden

Wegen der Unterkühlung des Sondenfeldes konnte die Wärmepumpe nur noch auf Teillast (zwei von drei Verdichtern) betrieben werden. Durch Cheminéeöfen wurde die fehlende Wärmeleistung z.T. ergänzt.

Prinzipschema

Nachfolgend ist die hydraulische Einbindung der einzelnen Komponenten ersichtlich:

Bild 2



WÄRMEABGABE:

Über Enthitzer/Unterkühler erfolgt die Warmwassererzeugung, die Heizwärme wird über den Kondensator erzeugt. Im Sommerbetrieb ohne Heizwärmeverbrauch wird der Enthitzer zur Warmwassererzeugung teilweise im Kondensationsbereich betrieben.

WW-Erzeugung über
Enthitzer/Unterkühler

4.1.1 Parameter Wärmepumpe

Typ	Verdichter	Kältemittel	P-Heiz kW	PNT kW	P-Kälte kW
KWT WP MS 125-4	3 x Scroll	R 22	92	22	71

4.1.2 Parameter Erdwärmesonden

Typ	Dimension	Abstand	Durchfluss Lit./h	ΔT K	Leistung
1995: koaxial HDPE 90mm	7 x 100 m	12 x 3 m	9'600	2.5	25.2
2000: duplex Grundag 33 mm	3 x 270 m	Schrägboh.	9'600	4.3	42.8

4.1.3 Parameter Solarkollektoren

Typ	Dimension	C1 W/m ² K	Durchfluss Lit./h
Solardur-S 2500	87 m ² (65+22)	15	10'000

4.1.4 Parameter Heizung

Typ	Durchfluss Lit./h	Leistung
Bodenheizung		86

4.1.5 Parameter Warmwasser

Begleit-Heizung Typ	Länge m	Leistung kW	Speicher Liter	Bedarf m ³ /a
Raychem HWAT-M	335	1.9	2 x 800	600

4.2 Zielsetzung

Das Bundesamt für Energie hat grosses Interesse, die vorgesehenen Optimierungsarbeiten messtechnisch begleiten zu lassen und falls notwendig auszudehnen. Insbesondere ist die Einbindung der Solaranlage auf der Wärmeerzeugerseite und die WW-Aufbereitung inkl. Zirkulation auf der Verbraucherseite zu überdenken. Die erarbeiteten Optimierungsmassnahmen sind messtechnisch zu begleiten und die Anlage einer Betrieboptimierung zu unterziehen.

Betrieboptimierung
messtechnisch begleiten
und weitere Massnahmen
untersuchen

5. Grundlagen

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit erfolgt bauteilbezogen mit dem AFB-Worksheet "Beurteilung von Energiesparmassnahmen", Version vom September 96 (AFB/GR3/56).

Kapitaldienst

Realer Kalkulationszinssatz	2.0 %
Reale Wartungs-, Bedienungs- und UH-Kostensteigerung	1.0 %
Reale Energiepreisteuerung	1.5 %

Anwendung des AFB-Worksheets

Energiepreis Elektro

BKW FMB AG	Arbeitspreis	HT	NT
	Winter	14.0 / 51%	9.5 / 32%
	Sommer	11.0 / 13%	7.0 / 4%
Abo.-Preis Fr. 8.50-/Monat			

gewichteter Mittelwert 10.2 Rp/kWh

Der Mittelwert berechnet sich aus den effektiv bezogenen Tarifanteilen in der Periode 2000 - 2001 der Wärmepumpe.

Bei Massnahmen, die nicht vom Heizbetrieb abhängig sind, wie z.B. Warmwasserbereich, wird mit dem **Mittelwert von 10.4 Rp./kWh** gerechnet.

UMWELTKOSTEN

Die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge (KEPZ) resp. Umweltkosten berücksichtigen die vermiedenen externen Kosten durch die Schaden- und Risikoreduktion bei einer Energieeinsparung (z.B. Folgeschäden durch sauren Regen).

Einbezug der KEPZ gem.
HBA Kanton Bern

KEPZ Elektro, RRB/HBA Kt. Bern

Sparmassnahmen	10.0 Rp./kWh
Energiesysteme	5.0 Rp./kWh
Berechnungspreis Energiesysteme	15.2 Rp./kWh
Berechnungspreis Sparmassnahmen	20.2 Rp./kWh

Der Kosten-/Nutzenbetrachtung wurde somit unter Berücksichtigung der Umweltkosten "Elektro" ein Energiepreis von 20.2 Rp./kWh zu Grunde gelegt.

6. Lösungsweg

ERWEITERUNG SONDENFELD

Die erste Prüfung des Anlagekonzeptes ergab, dass eine bereits vorgesehene Erweiterung des Sondenfeldes nicht zu umgehen war. Mit der ausgeführten Erweiterung im Sommer 2000 mit zusätzlichen Duplexsonden resultierte nun eine Sondenbelastung von rund 47 W_{kälte}/Lfm.

Erweiterung des Sondenfeldes 2000

Die relevanten Energieströme wurden nach der Erweiterung des Erdsondenfeldes, vom Herbst 2000 bis Februar 2002, messtechnisch erfasst. Neben den eingebauten Wärmezählern standen auch zusätzlich Thermofühler im Einsatz, welche durch die Bewohner selbst bereits eingebaut waren. Die Daten der Wärmezähler wurden in 5-Minuten-Intervallen auf einem lokalen PC aufgezeichnet.

6.1 Ablesungen

Die Datenerfassung erfolgte einerseits durch wöchentliche Ablesungen folgender Wärmezähler:

Wöchentliche Ablesung
der Wärmezähler

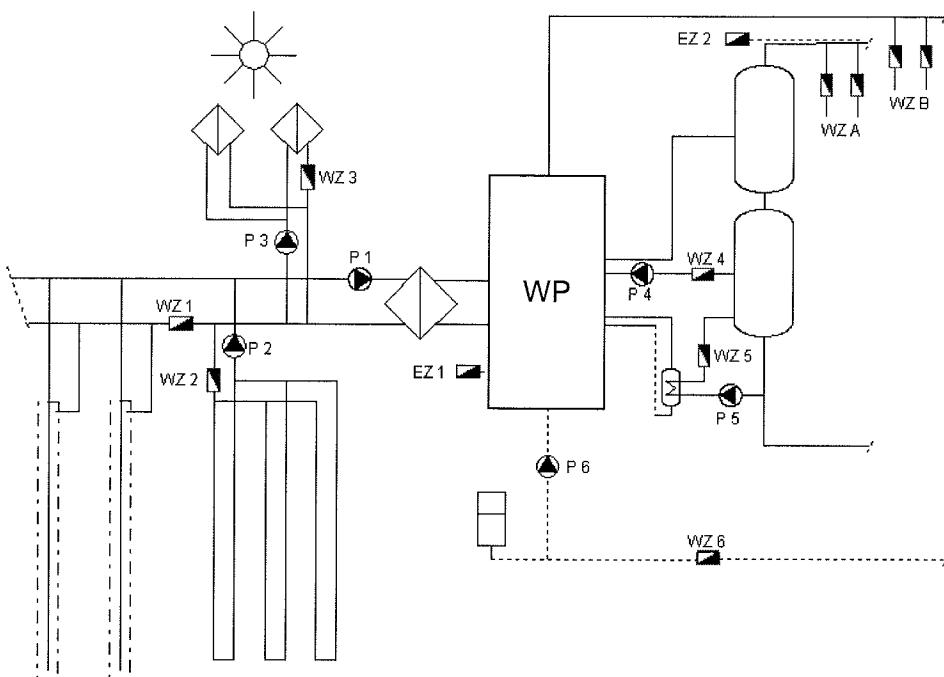


Bild 3

Wärmezähler		Durchfluss-Sensor
WZ 1	Erdsonden koaxial (1995)	SONO-2500 50 p 0.133 L
WZ 2	Erdsonden duplex (2000)	SONO-2500 50 p 0.133 L
WZ 3	Kollektorfeld gross	SONO-2500 32 p 0.04 L
WZ 4	Überhitzer	SONO-2500 25 p 0.04 L
WZ 5	Unterkühler	SONO-2500 25 p 0.04 L
WZ 6	Heizung Produktion	SONO-2500 50 p 0.133 L
WZ A	Warmwasser (bestehend)	SONO-2500 32 p 0.04 L
WZ B	Raumheizung (bestehend)	

6.2 Dynamische Messung

Durch die PC-Aufschaltung des M-Bus-Systems sowie einzelnen Anle-gefühlern standen auch 10-Minuten Temperatur-Mittelwerte zur Analyse zur Verfügung.

10-Minuten-Mittelwerte
aufgezeichnet

Die Daten wurden zu Stundenwerten zusammengefasst und erlaubten z.B. die Darstellung folgender Heizkurve. Weitere Auswertungen sind im Anhang 2 ersichtlich.

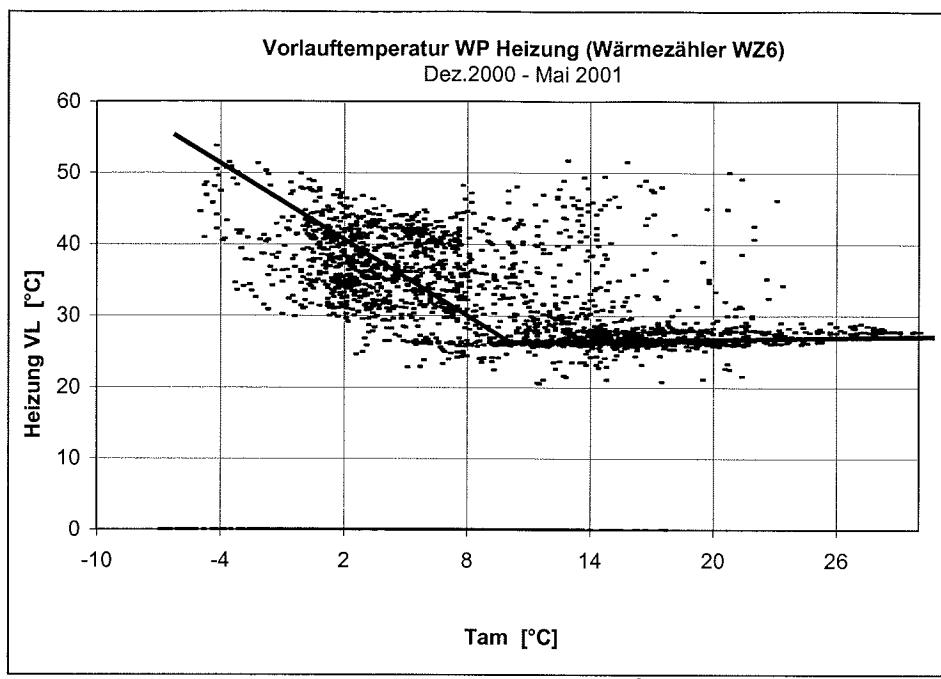


Bild 4

Obiges Diagramm veranschaulicht die grosse Streuung der Vorlauftemperatur "Heizung". Ein wesentlicher Faktor ist dabei das Benutzerverhalten der 19 Wärmebezüger.

Streuung durch Benut-
zerverhalten

6.3 Simulation Erdreich

Die Frage, welchen Effekt der solare Eintrag auf den Wärmepumpenbe-trieb der Eggmatt hat, wurde rechnerisch mit dem Simulationsprogramm EWS angegangen.

Berechnung des länger-
fristigen Effektes der so-
laren Aufladung

Das Erdwärmesondenmodul EWS rechnet mit bis zu acht verschiede-nen, horizontalen Erdschichten nach einem Erdwärmesonden-Modell, das in der Lage ist, das transiente Verhalten einer Erdwärmesonde bei minimaler Rechenzeit über mehrere Jahre korrekt zu simulieren.

Mit dem bekannten Bodenprofil (Anhang A3) wurde die Simulation der langfristigen Bodentemperatur und somit eine Aussage über den länger-fristigen Effekt der solaren Aufladung des Erdreiches möglich.

7. Betriebsanalyse

7.1 Energiebilanz

7.1.1 Nutzenergiebedarf

Der Nutzenergiebedarf Q_h und Q_{ww} wurde für die 19 Wohneinheiten anhand der Wärmeabrechnung 2000/01 ausgewertet und auf das SIA-Normjahr bezogen.

Deutliche Unterschreitung des SIA-Grenzwertes

Nachfolgendes Diagramm zeigt die nutzer- und architekturbedingte Streuung. Der SIA 380/1(1988)-Zielwert Q_h+Q_{ww} für Neubauten wird dabei mit einer Ausnahme deutlich unterschritten.

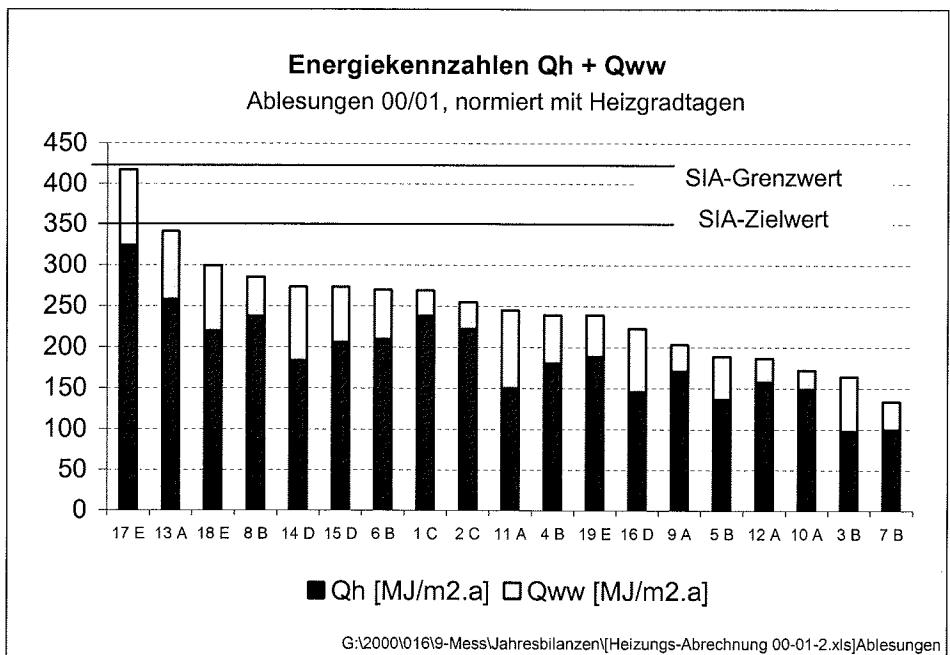


Bild 5

Der Mittelwert des Heizenergiebedarfes Q_h beträgt 188 MJ/m².a, jener für Warmwasser Q_{ww} 58 MJ/m².a.

7.1.2 Primärenergie

Anhand der langjährigen Elektrobilanzierung kann der Primärenergiebedarf seit der Erstellung wie folgt dargestellt werden. Augenfällig ist dabei die Verbrauchszunahme mit der 2. Bauetappe sowie der Holzenergiebedarf in den Speicheröfen in der Heizperiode 1999/2000. Dieser wurde notwendig durch die erforderlich gewordene Ausschaltung einer der drei WP-Kompressoren infolge der Erdsondenunterkühlung.

Seit 1999 stetige Verbesserung der JAZ

Auch fällt der grosse Anteil des Elektrobedarfes "Infra" auf. Dieser wird nicht unwe sentlich durch den Pumpenbetrieb der Erdsonden verursacht.

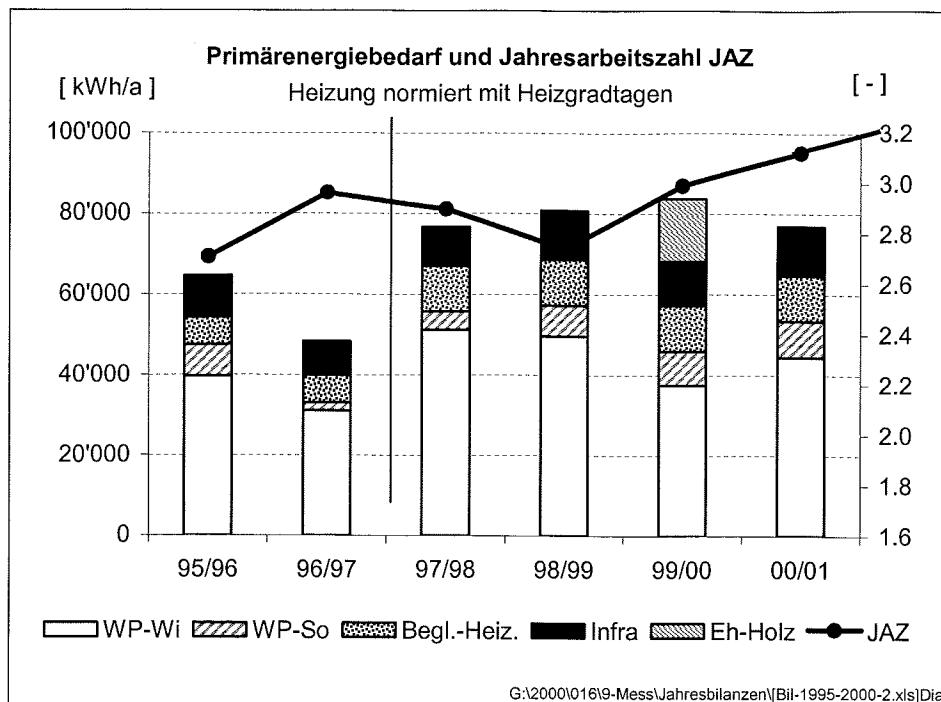


Bild 6

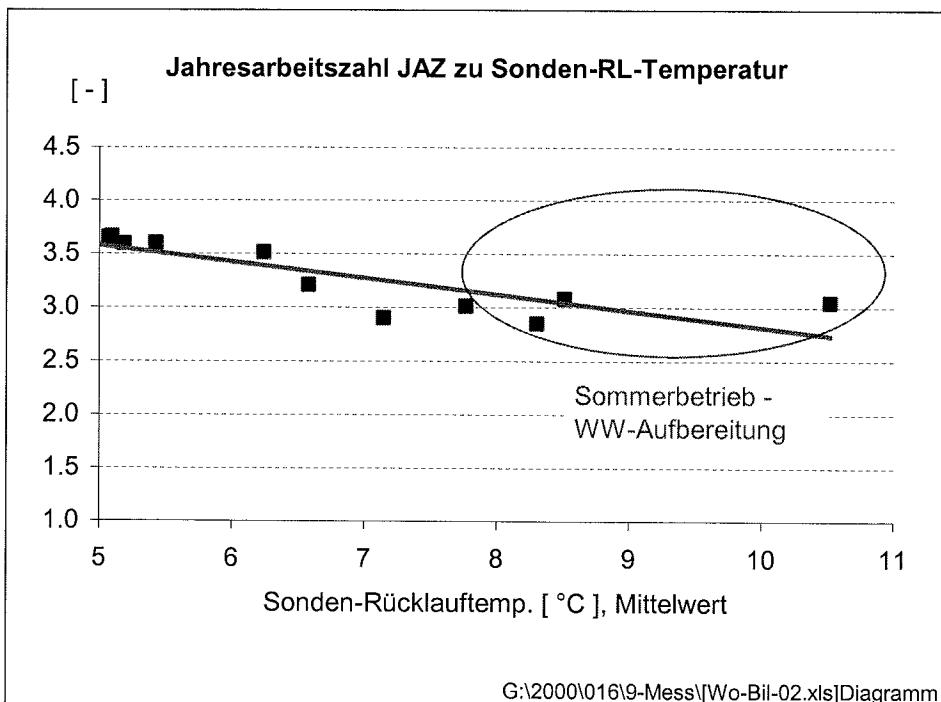
Ab 1997 zweite Etappe,
1999/00 Nachheizen mit
Cheminéeöfen

7.2 WP-Betrieb

Die Jahresarbeitszahl JAZ ist vorangehend seit der Bauzeit und nachfolgend in Abhängigkeit der Erdsonden-Rücklauftemperatur ersichtlich:

Schlechter WP - Wir-
kungsgrad im Sommer
wegen WW-Erzeugung

Bild 7



Durch die WW-Aufbereitung verschlechtert sich die JAZ im Sommer trotz der höheren Sondentemperatur.

WOCHEWERTE DER ARBEITSZAHL (AZ)

Der Verlauf der Arbeitszahl wird nachfolgend anhand der Wochenbilanzen aufgezeigt. Es zeigt sich dabei die sommerliche Effizienzverschlechterung durch die alleinige Warmwassererzeugung, d.h. dem Wegfall der Niedertemperaturwärme "Heizung". Die AZ sinkt dabei von durchschnittlich 3.5 im Winterhalbjahr auf 3.0 im Sommer.

Hoher Elektrobedarf für
Infrastruktur

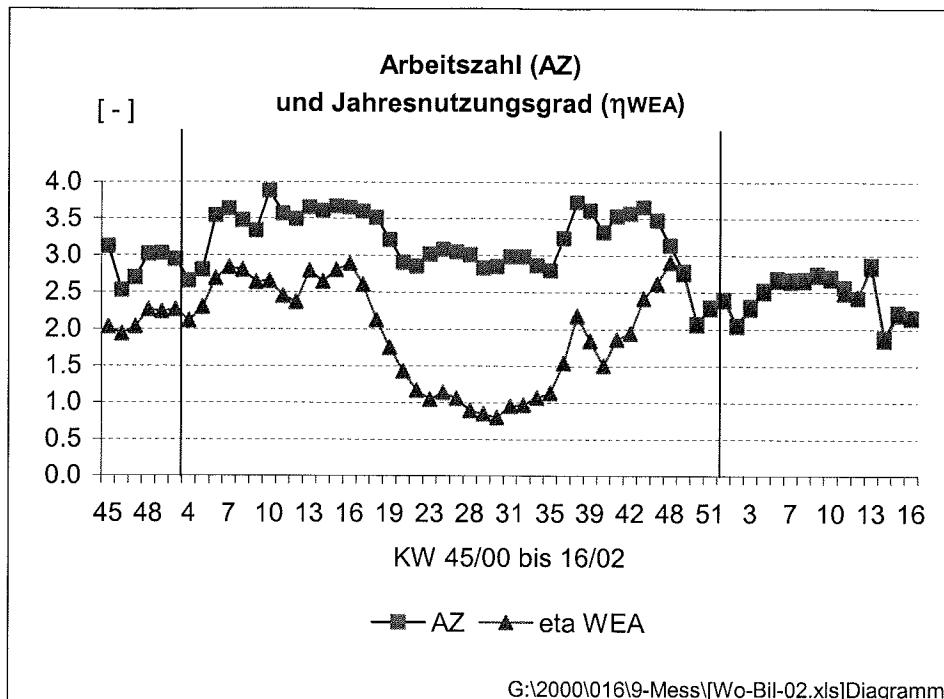


Bild 8

Noch ausgeprägter zeigt sich die sommerliche Effizienzverschlechterung mit dem Anlagewirkungsgrad "eta WEA" (η Wärmeerzeugungsanlage). Mit dieser Kenngrösse wird auch der Elektrobedarf "Infrastruktur Wärmeerzeugung" berücksichtigt.

BEURTEILUNG DER ANLAGE-EFFIZIENZ:

Ein Vergleich mit Resultaten des BFE-Projektes „Feldanalyse Wärme pumpenanlagen (FAWA)“ zeigt, dass die Anlageeffizienz besser ausfällt gegenüber den Kennwerten von schweizerischen Sole/Wasser-Wärme pumpen aus demselben Erstellungsjahr.

JAZ ist besser als analoge Anlagen mit gleichem Baujahr

Verbesserungsfähig ist die sommerliche Anlage-Effizienz. Ein Lösungs ansatz wird bei der Massnahmenerarbeitung vorgeschlagen.

7.3 Solarer Bruttowärmeertrag

Die monatliche Bilanzierung des solaren Bruttowärmeertrages QSB für das Jahr 2001 wird nachfolgend der Berechnung, die im Rahmen der Auslegung der Erdsondenauslegung erfolgte, gegenübergestellt.

Kollektorertrag im Winter
bei Projektierung über-
schätzt

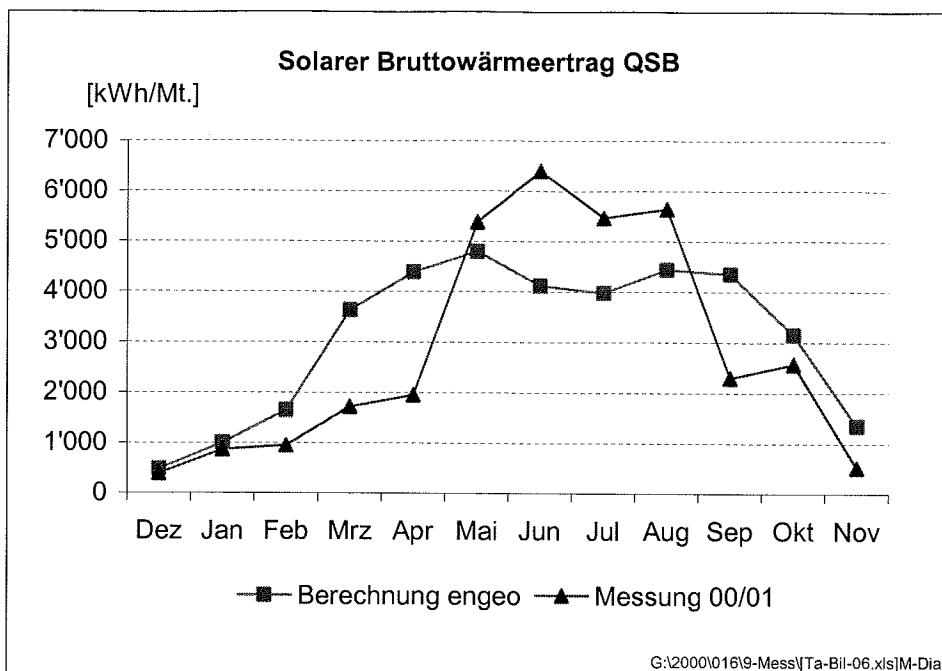


Bild 9

Es zeigt sich, dass der Ertrag im Winter zu hoch, jener im Sommer zu tief berechnet wurde. Dies wirkt sich insofern negativ aus, weil die saisonale Speicherung im Erdreich nicht die Wirkung zeigte, die man sich erhoffte.

Der Kollektorkoeffizient η (-) ist definiert als Quotient des Bruttowärmeertrages QSB zur Globalstrahlung HK und beträgt im Mittel 0.26. Die Wochenmittelwerte sind nachfolgend dargestellt.

Kollektorkoeffizient
 $\eta = 0.26$

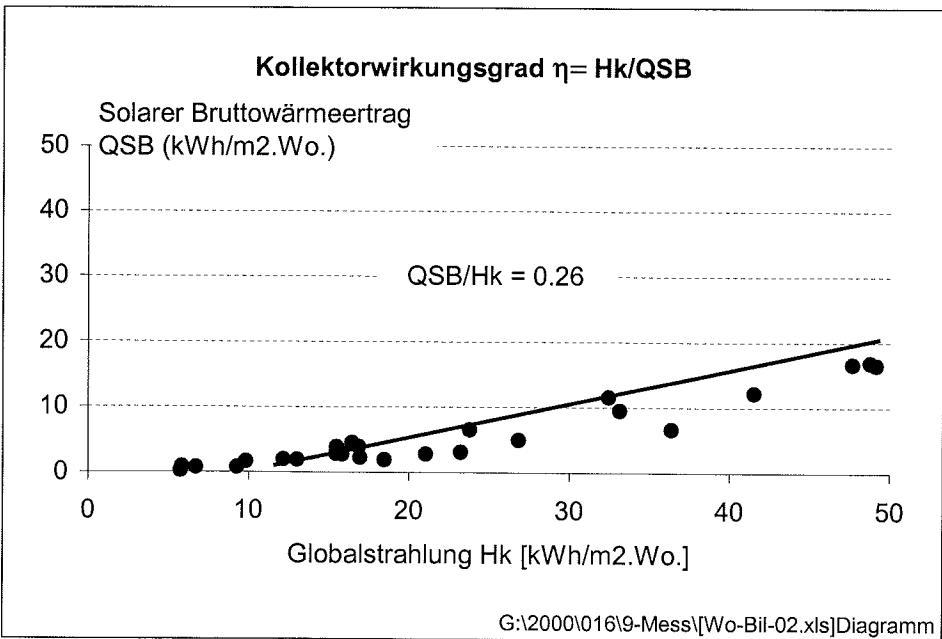


Bild 10

Der Solareintrag in das Erdsondenfeld kann im Sommer bis zu 1'400 kWh/Woche betragen und sinkt im Winter auf Werte um 100 kWh/Woche.

Kollektorertrag im Winter
lediglich um 100 kWh/Wo.

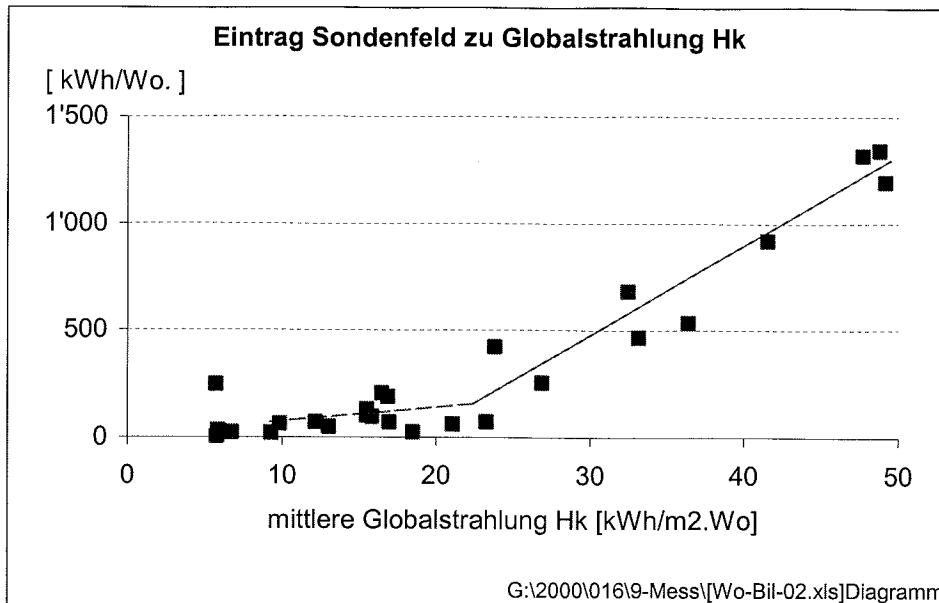
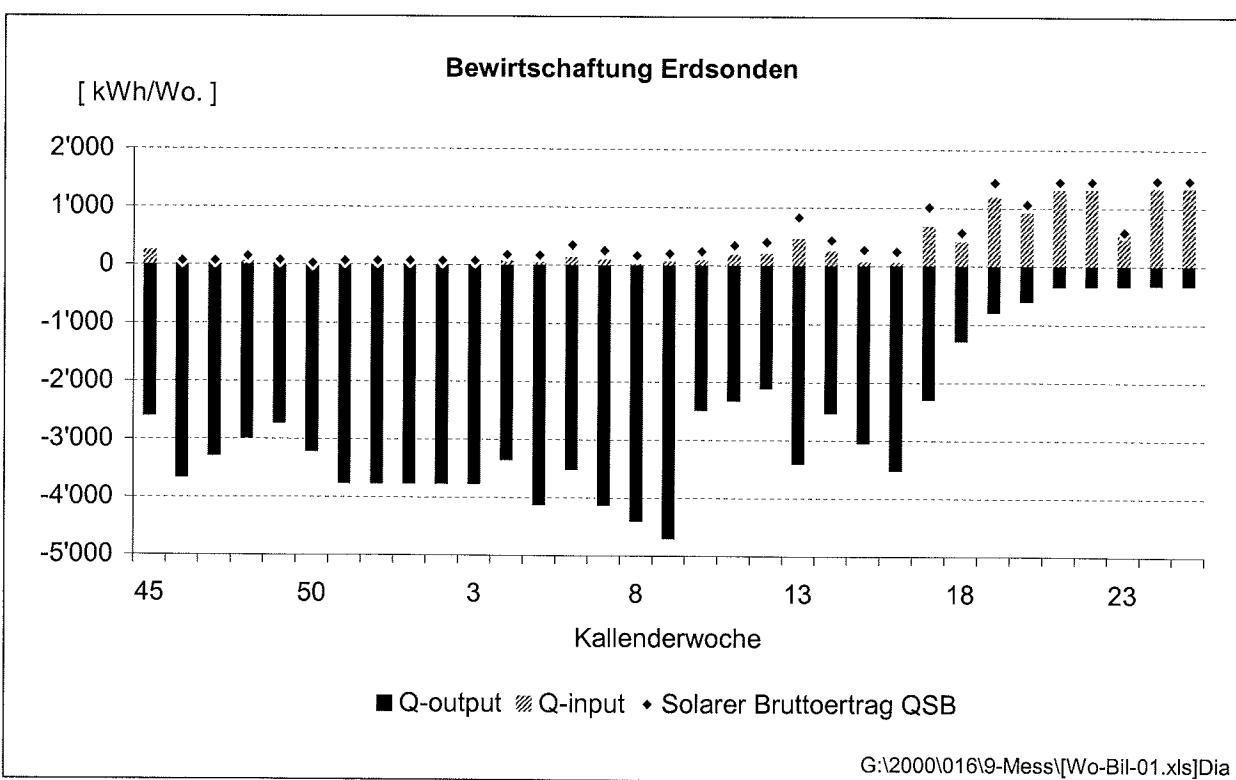


Bild 11

7.4 Erdsonden

Das Energiemanagement beider Erdsondenfelder wurde mit Wärmezählern bilanziert. Die nachfolgende Darstellung zeigt die Wochenbilanz Input und Output beider Sondenfelder sowie der Solarertrag.

Bild 12



Auch wenn der solare Eintrag zu einer deutlichen Regenerierung des Erdreiches führen würde, beträgt der Anteil des solaren Inputs bezogen auf den jährlichen Wärmeentzug durch die WP lediglich 20 %.

SIMULATION MIT EWS-PROGRAMM

Nachfolgendes Diagramm zeigt die mit EWS berechnete Entwicklung über 18 Jahre der Soletemperatur OHNE solare Aufladung. Der Darstellung überlagert sind die im Jahr 2001, also nach 6 Betriebsjahren gemessenen Soletemperaturen (es handelt sich allerdings um eine "Mischtemperatur" von altem und neuem Sondenfeld):

Solareintrag hat keine
Auswirkung auf die Sole-
temperatur im Winter

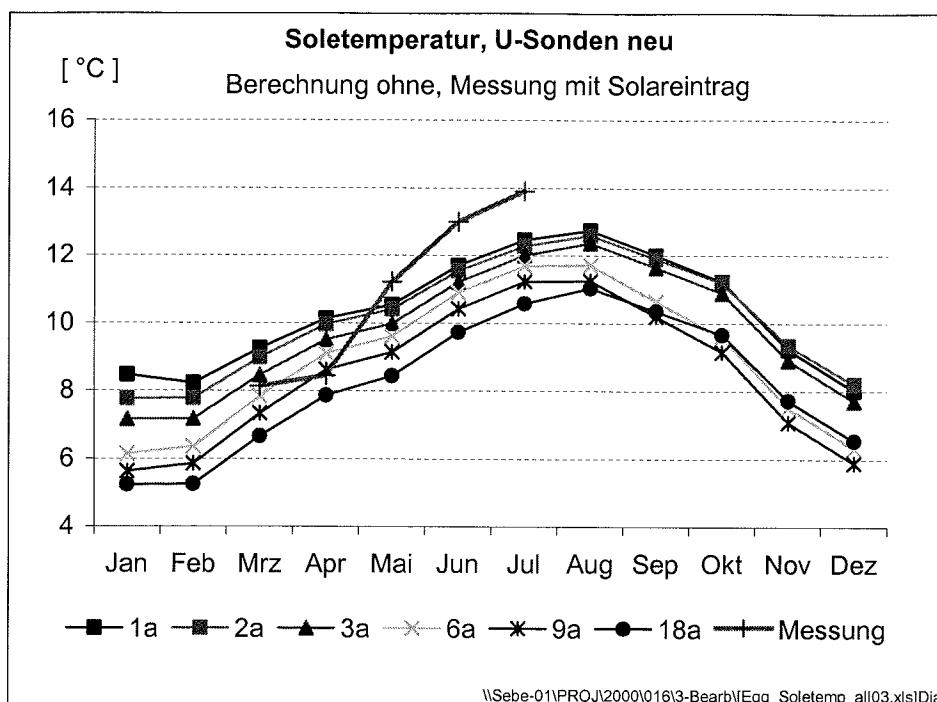


Bild 13

a = Jahr ab
Inbetriebsetzung

Die Gegenüberstellung veranschaulicht deutlich, dass der solare Wärmeeintrag keinen Effekt auf die Soletemperatur im Winter hat. Hingegen findet eine "Direktunterstützung" in den Sommermonaten statt, indem die Soletemperatur um rund 2°C gegenüber der Berechnung angehoben wird.

Der wirtschaftliche Effekt der solaren Unterstützung des WP-Betriebes wird im nachfolgenden Kapitel "Optimierung" behandelt.

7.5 Begleitheizung

Es ist eine Begleitheizung der Firma Raychem im Einsatz, der Elektrizitätsbedarf wird nicht separat gemessen. Einerseits verursachten Kurzschlüsse und Unterbrüche einen unbefriedigenden WW-Betrieb. Andererseits wurde aufgrund der Elektromessung "Infra" ein hoher Strombedarf durch die Begleitheizung vermutet.

Unzureichende WW-
Versorgung durch Kurz-
schlüsse, zudem hoher
Elektrobedarf

Mit nachfolgenden Herstellerangaben wurde der zu erwartende Strombedarf eruiert. Mit dem eingesetzten Heizband-Typ HWAT-M und einer Temperatur von 60°C ergibt sich eine elektrische Leistungsaufnahme von 5.8 W/Meter.

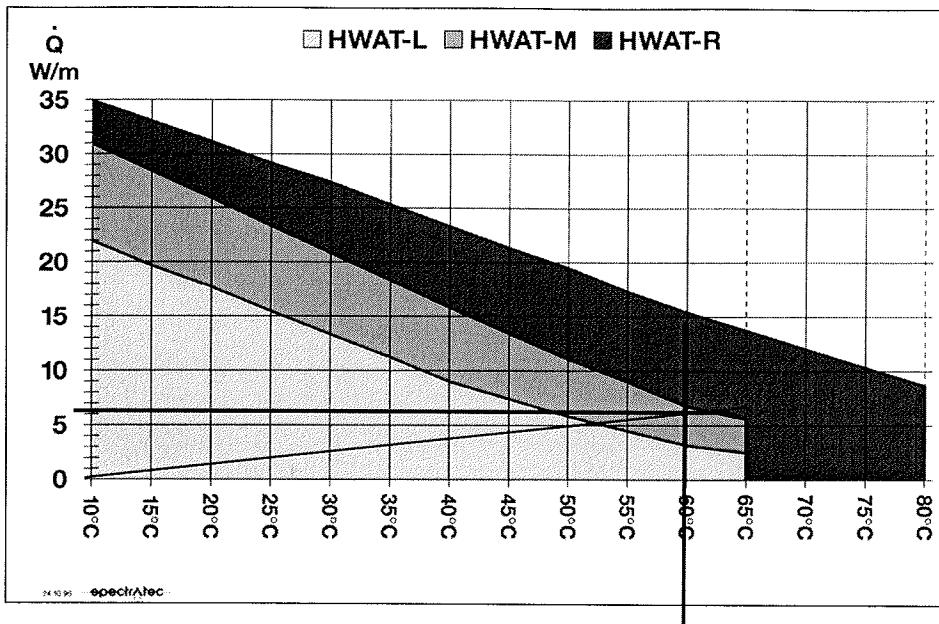


Bild 14

(System „Raichem“)

Das mit der Begleitheizung beheizte Warmwasser-Leitungsnetz hat eine Länge von rund 335 Meter.

Dimension	28-38 mm	
Dämmstärke	40 mm	
Leistungssteller	30 %	
Kellertemperatur	12 °C	
Haltetemperatur	40 °C	
Leistungsbedarf	5.8 W/m	1.9 kW
Betriebszeit	09:00 bis 07:00	22 h/Tag
Annahme: Betriebsdauer Temperaturhaltung		16 h/Tag
Energiebedarf		11'350 kWh/a

Bei einem so definierten Betrieb entstehen mit dem verrechneten BKW-econom1-Tarif Betriebskosten von Fr. 1'180.- pro Jahr.

8. Optimierung

8.1 Solare Regenerierung

NUTZEN DER SOLAREN REGENERIERUNG

Anhand der gemessenen resp. berechneten Beziehung zwischen Wärmepumpen-Leistungszahl und Aussentemperatur sowie nachfolgender Temperaturverteilung für den Standort Bern wurde der Elektrobedarf mit und ohne solare Regenerierung berechnet.

Berechnung des Primär-energiebedarfes mit und ohne solare Aufladung

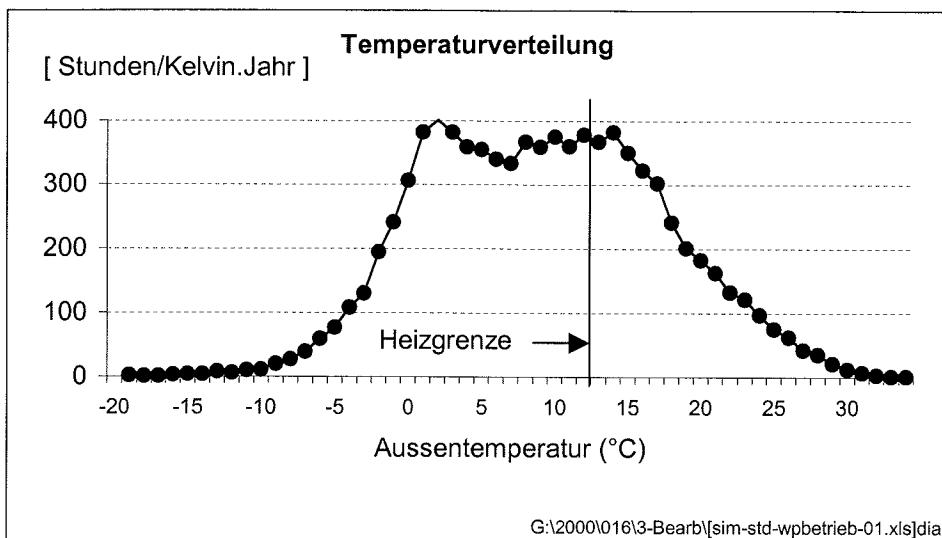


Bild 15

Nachfolgendes Diagramm zeigt die Temperaturen sowie die berechnete Leistungsaufnahme der Wärmepumpe ohne solare Aufladung.

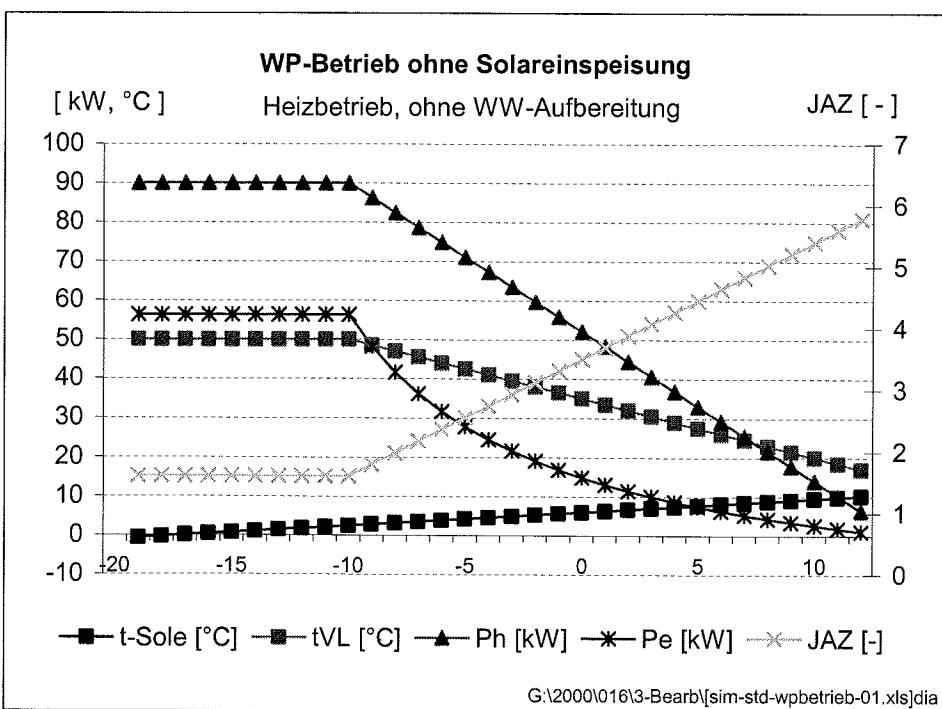


Bild 16

In Abhängigkeit der berechneten Soletemperaturen ergaben sich mit resp. ohne Regenerierung jeweils folgende Leistungszahlen:

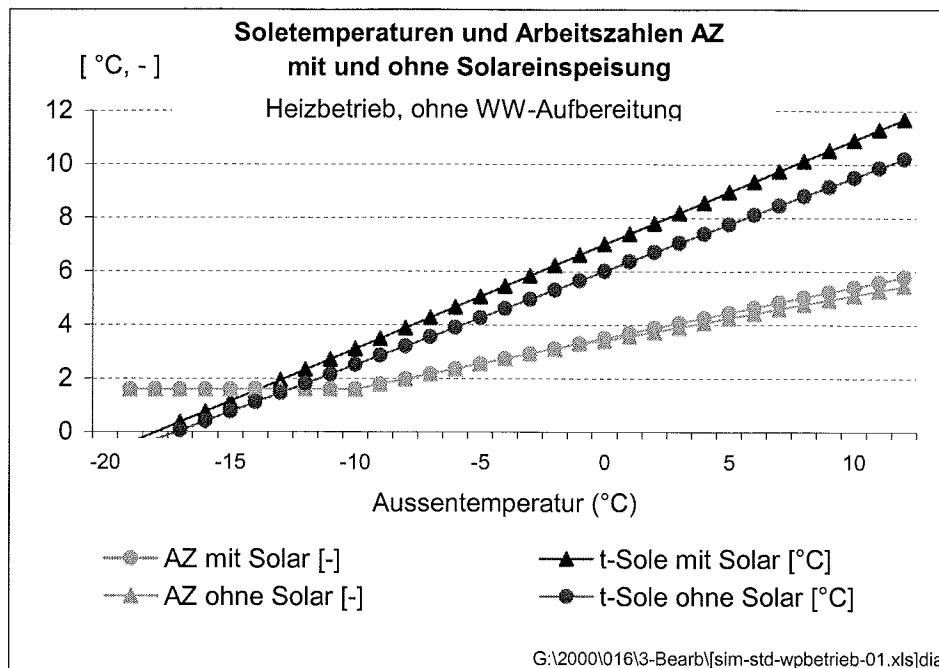


Bild 17

Mit einer Heizwärmeproduktion von 116 MWh/a ergibt sich bei aktuellem Betrieb unter Berücksichtigung der solaren Einspeisung ein WP-Elektrobedarf von 56 MWh/a.

Durch solare Aufladung ergibt sich eine Einsparung von jährlich Fr. 140.-

Zur Produktion der gleichen Heizwärme ohne solare Einspeisung ergibt sich ein Elektrobedarf von 57.4 MWh, d.h. es entsteht ein Mehrbedarf von 1.4 MWh pro Jahr. Dem entsprechen mit dem BKW-econom1 Tarif jährliche Mehrkosten von rund Fr. 140.-.

Empfehlung: Die Erdsondenfelder der Eggmatt sind für eine effektive solare Regenerierung ungeeignet.

Die Solareinspeisung führt jedoch auch unter Berücksichtigung des Pumpenstromes für die Solaranlage während der Heizperiode zu einer Verbesserung des Anlage-Wirkungsgrades.

Sofort:

Wir empfehlen, die unverglasten Kollektoren bis zum Erreichen ihrer Nutzungsdauer während der Heizperiode entsprechend dem bisherigen Konzept zu betreiben und in der übrigen Zeit ausser Betrieb zu nehmen.

Kollektorbetrieb in der Heizperiode wie bisher

Mittelfristig:

Mit einem Teilersatz der bestehenden durch verglaste Kollektoren und dem Einsatz eines Solarspeichers kann grundsätzlich effizient Warmwasser zentral solar erzeugt werden (siehe nachfolgendes Kapitel). Dies auch unter Berücksichtigung des teilweisen Wegfalls der Einspeisung ins Erdreich.

Zentrale WW-Erzeugung mit verglasten Kollektoren

8.2 Solare WW-Vorwärmung

Grundsätzlich stellt sich in der Eggmatt die Frage, ob an der zentralen WW-Aufbereitung mit den Zirkulationsverlusten und wegen dem Raum- mangel ohne Möglichkeit einer solaren Vorwärmung festgehalten werden soll. Als Alternative bietet sich die dezentrale WW-Versorgung mit solarer Vorwärmung an.

Zentrale- versus dezentrale WW-Vorwärmung

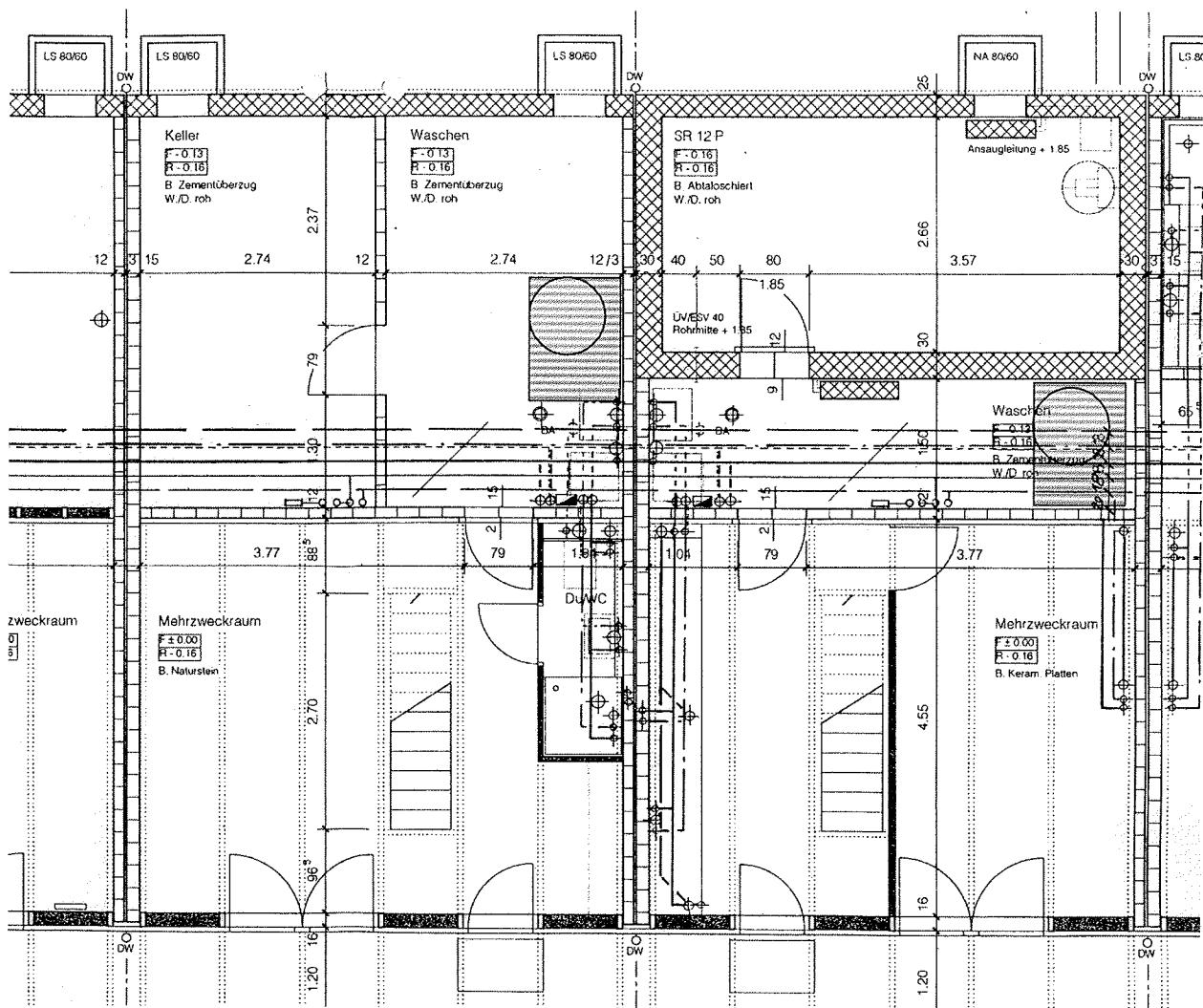
8.2.1 Dezentrale WW-Vorwärmung

Bei einer Demontage der unverglasten Kollektorfelder könnte die frei werdende Dachfläche für verglaste Kollektoren zur dezentralen WW- Vorwärmung genutzt werden. Ebenso eignen sich die übrigen Dachflä- chen zur Montage von Kollektoren.

Über die Steigzonen müssten zusätzlich zwei Rohre mit Aussendurch- messer inkl. Dämmung von rund 8 cm bis zum Dach geführt werden. Im UG nehmen der Solar- und Warmwasserspeicher eine Fläche von rund 2 m² in Anspruch.

Nachfolgende Abbildung zeigt mögliche Aufstellungen und den ungefäh- ren Platzbedarf der dezentralen, solaren WW-Vorwärmung:

Bild 18



- Bei low-flow Anlagen wird mit einer Kollektorfläche von rund 6 m² für vier Personen im Sommer eine volle Solarabdeckung erreicht.
- Im Winter erfolgt eine Vorwärmung über die Solar- und Heizungsanlage, der Restwärmebedarf wird über ein Elektroregister gedeckt.
- Wenn die Heizung im Sommer ausser Betrieb genommen wird, kann das Elektro-Register für Schlechtwetterphasen eingesetzt werden.

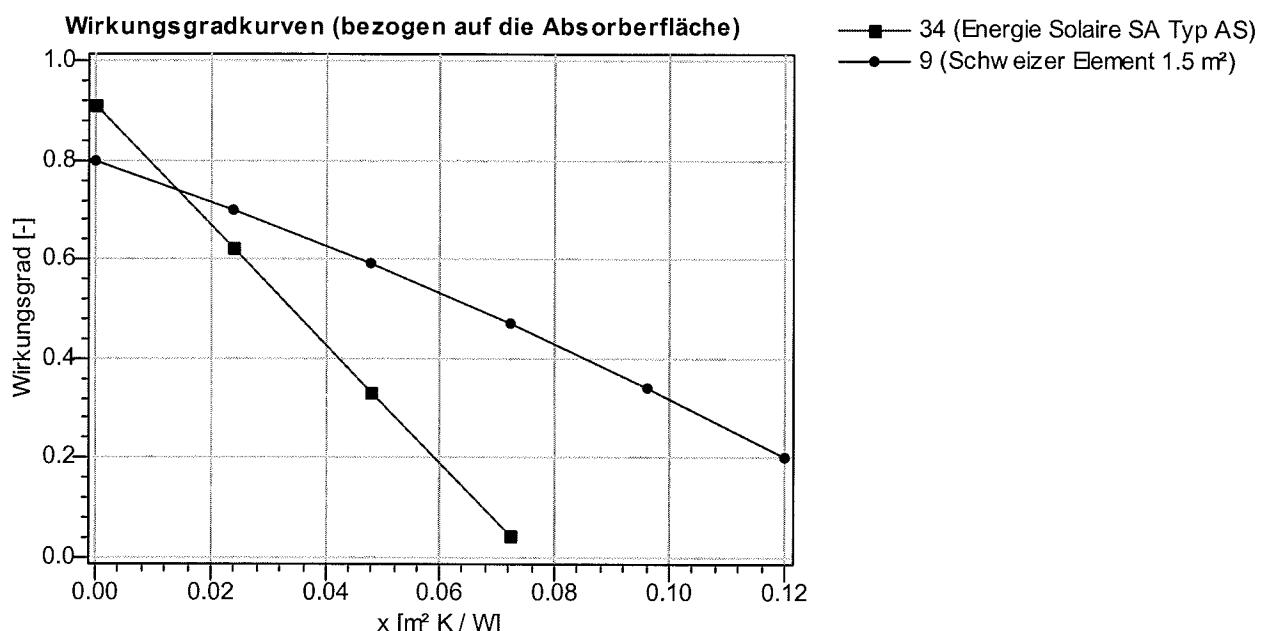
Ohne bauliche Aufwendung ist für eine dezentrale Solaranlage mit Investitionen von rund Fr. 12'000.- bis Fr. 18'000.- pro Haus zu rechnen.

Variante Solar dezentral:
rund 26 Rp/kWh

8.2.2 Bestehendes Kollektorfeld für zentrale WW-Vorwärmung

Nachfolgendes Diagramm stellt den Kollektorwirkungsgrad eines verglasten Kollektors (blau) demjenigen eines wie in der Eggmatt eingesetzten, unverglasten Kollektors gegenüber:

Bild 19



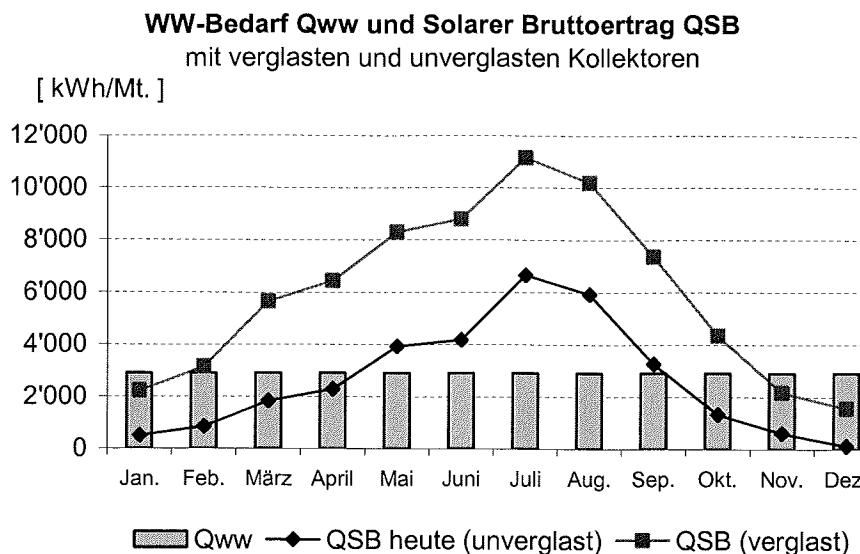
Für eine solare, zentrale WW-Vorwärmung könnten auch die vorhandenen unverglasten Kollektoren eingesetzt werden.

BERECHNUNG MIT POLYSUN:

Mit Hilfe des EDV-Programmes Polysun 3.3 wurde standortbezogen der mögliche Solarertrag für eine Warmwasser-Vorwärmung abgeschätzt.

Bei einem Einsatz von unverglasten Kollektoren ist in Bezug auf den Solarertrag für Warmwasser zu berücksichtigen, dass bei Kollektortemperaturen über 25 - 30°C die Kollektor-Verluste massiv zunehmen, was auch obiges Diagramm veranschaulicht.

Bild 20



G:\2000\016\3-Bearb\[Kollektor-01.xls]Dia

- Mit den unverglasten Schwimmbadkollektoren können ohne grosse Verluste lediglich Temperaturen von 25 - 30°C erreicht werden. Der Kollektorertrag beträgt dabei 15 MWh/a. Bezogen auf den WW-Bedarf von 35 MWh/a bei 60°C dürfte der Solareintrag zur Vorwärmung noch 6 - 8 MWh/a betragen (Deckungsgrad rund 15 %).
- Es wird ein Solarspeicher mit ca. 3 m³ Inhalt notwendig, welcher mit den bestehenden WW-Speichern in Serie geschalten wird. Der bestehende Technikraum im Haus B3 ist bereits restlos verbaut. Als möglicher Standort ist der Wasch- oder Mehrzweckraum denkbar.

Ohne bauliche Aufwendungen ist für den zentralen Solarspeicher mit den bestehenden Kollektoren inkl. Verrohrung und Steuerung mit Investitionen um rund Fr. 25'000.- zu rechnen.

Variante Solar zentral,
unverglaste Kollektoren:
rund 40 Rp/kWh

8.2.3 Verglaste Kollektoren für zentrale WW-Erwärmung

Unter Berücksichtigung des für die WW-Erwärmung sehr schlechten Wirkungsgrades von unverglasten Kollektoren sowie deren eingeschränkten Nutzungsdauer bietet sich als Alternative für die Eggmatt an, verglaste Kollektoren einzusetzen.

So kann z.B. mit 20 m² ein Solarertrag von rund 13 MWh/a erwartet werden, was einem WW-Deckungsgrad von nahezu 40 % entspricht (Annahme: 650 kWh/m².a). Die verbleibenden unverglasten Kollektoren können weiterhin während der Heizperiode zur Unterstützung der Wärmepumpe eingesetzt werden.

Die Investitionen belaufen sich bei der Variante "Verglaste Kollektoren zentral" auf rund Fr. 36'000.-. Wegen der längeren Nutzungsdauer und des höheren spezifischen Ertrages ergibt sich ein tieferer Wärmepreis gegenüber der Variante mit den bestehenden Kollektoren.

Variante Solar zentral,
verglaste Kollektoren:
rund 17 Rp/kWh

Empfehlung: Wir empfehlen, das Warmwasser weiterhin zentral zu erzeugen. Neue, dezentrale Solaranlagen führen wegen den baulichen Aufwendungen zu relativ hohen Kosten. Zudem konkurrenzieren jede zusätzliche dezentrale Anlage die bestehende, zentrale WW-Versorgung und macht diese unwirtschaftlicher.

Mit dem Teil-Ersatz der unverglasten durch verglaste Kollektoren kann als Option zentral Warmwasser erzeugt werden. So führt der Einsatz von 20 m² Kollektoren zu einem solaren WW-Deckungsgrad von rund 40%. Ein notwendiger Solarspeicher kann allerdings nicht mehr im Heizungsraum untergebracht werden. Als Möglichkeit ist der Wasch- oder Mehrzweckraum denkbar.

8.3 Unterkühler

Die Unterkühlung im Kältekreislauf wird gemäss der Herstellerfirma mit einer Wärmeleistung von 10 bis 15 % der Gesamt-WP-Leistung ausgelegt. Die gemessene Maximalleistung betrug 2 kW bei einem ΔT von 11 K und einem Wasserdurchfluss von 0.05 m³/h.

Die hohe Temperaturdifferenz im Unterkühler-Kreislauf bei gleichzeitig sehr geringem Durchfluss deutet auf eine Verkalkung des Unterkühler-Wärmetauschers hin. Das Frischwasser in der Eggmatt ist sehr stark kalkhaltig. Bei vollem Durchfluss ist mit einer Leistung von 9 bis 13 kW zu rechnen.

Starke Verkalkung

Für die Entkalkung des Unterkühlers ist mit Fr. 700.- bis Fr. 800.- zu rechnen (Voraussetzung, der Kreislauf ist nicht komplett verkalkt, d.h. eine minimale Durchströmung ist noch möglich). Falls der Unterkühler komplett zu ist, muss ein neuer Sammler mit integrierter Unterkühlschlange zu Fr. 3'000.- eingesetzt werden.

Empfehlung: Wir empfehlen, den Unterkühler zu entkalken. Ein Ersatz ist nur dann sinnvoll, wenn am bestehenden Betriebskonzept festgehalten wird.

9. Weiteres Vorgehen

Wir empfehlen den Eggmatt-Bewohnern für eine Effizienz-Verbesserung der Wärmeversorgung folgendes weitere Vorgehen:

Sofort:

1. Ausschalten der solaren Ladung der Erdsondenfelder ausserhalb der Heizperiode sowie neue Einregulierung der Pumpen-Beschaltung in Abhängigkeit der Systemtemperaturen, um eine Erdkollektor-Entladung über dem Absorber zu vermeiden.
2. Entkalkung des Unterkühlers.
3. Weiterführung der Energiebuchhaltung mit monatlichen Ablesungen der vorhandenen Zähler und Beurteilung anhand der vorliegenden Diagramme.

Keine solare Aufladung
im Sommer

Bis 2010:

4. Teilersatz der Kollektoren mit verglasten Typen und Einsatz eines Solarspeichers zur zentralen solaren WW-Erzeugung (die Kollektoren sind dann 12-jährig und haben ihre Nutzungsdauer erreicht).

Solare, zentrale WW-
Erzeugung

10. Anhang

A 1	Monatsmittel der Stundenwerte	27
A 2	Mess-Stundenwerte	29
A 3	Bodenprofile	34
A 4	Entkalkungs-Systeme	36
A 5	Erfahrungswerte zur Grobdimensionierung	37
A 6	Erdspeicher	38

A 1 Monatsmittel der Stundenwerte

Zur Dokumentation des Anlagebetriebes werden nachfolgend weitere Auswertungen dargestellt und kurz kommentiert.

Bei den folgenden fünf Diagrammen ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den dargestellten Werten um Monatsmittelwerte handelt.

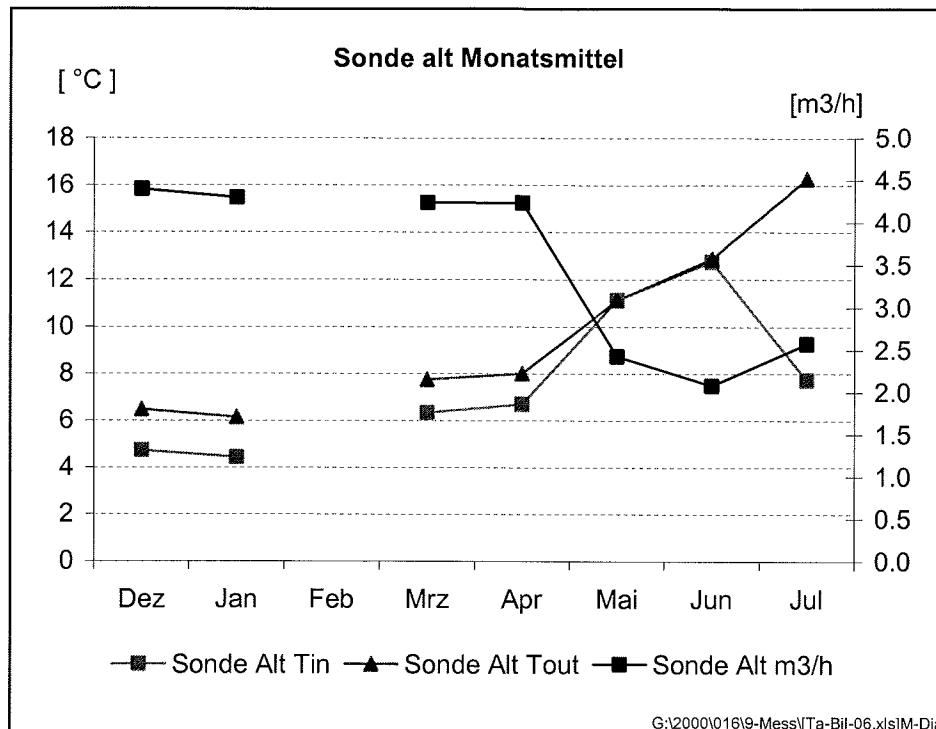


Bild 21

Die Pumpen des Sondenkreislaufes wurden zeitweise in den Monaten Mai – Juli wegen Unterhalts- und Reparaturarbeiten ausgeschalten, von daher nahm der mittlere Durchfluss in diesen Monaten markant ab.

Die geringe Temperaturspreizung weist auf einen hohen Durchfluss hin.

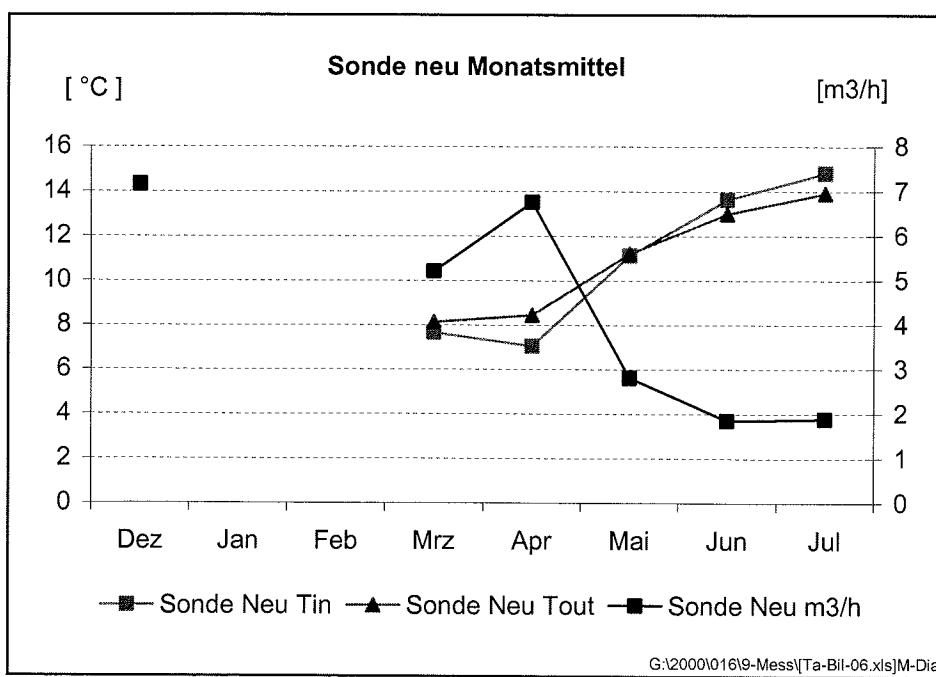


Bild 22

Der Temperaturverlauf belegt den Erdsondenfeld-Entladebetrieb in den Monaten März-April resp. den Ladebetrieb im Juni-Juli, wobei die mittlere Temperaturdifferenz 1 Kelvin beträgt.

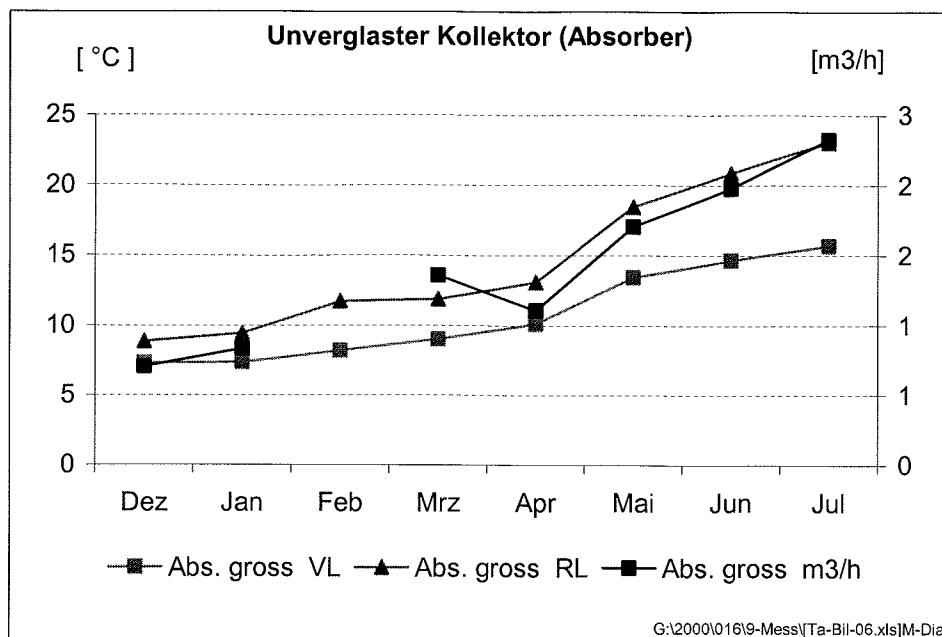


Bild 23

Im Absorberkreislauf wurde im Monatsmittel eine Temperaturdifferenz von rund 2 Kelvin im Dezember bis ca. 8 Kelvin im Juli gemessen. Durch die Beschaltung der Absorberpumpe in Abhängigkeit zur Einstrahlung nimmt der mittlere Durchfluss in den Sommermonaten stark zu.

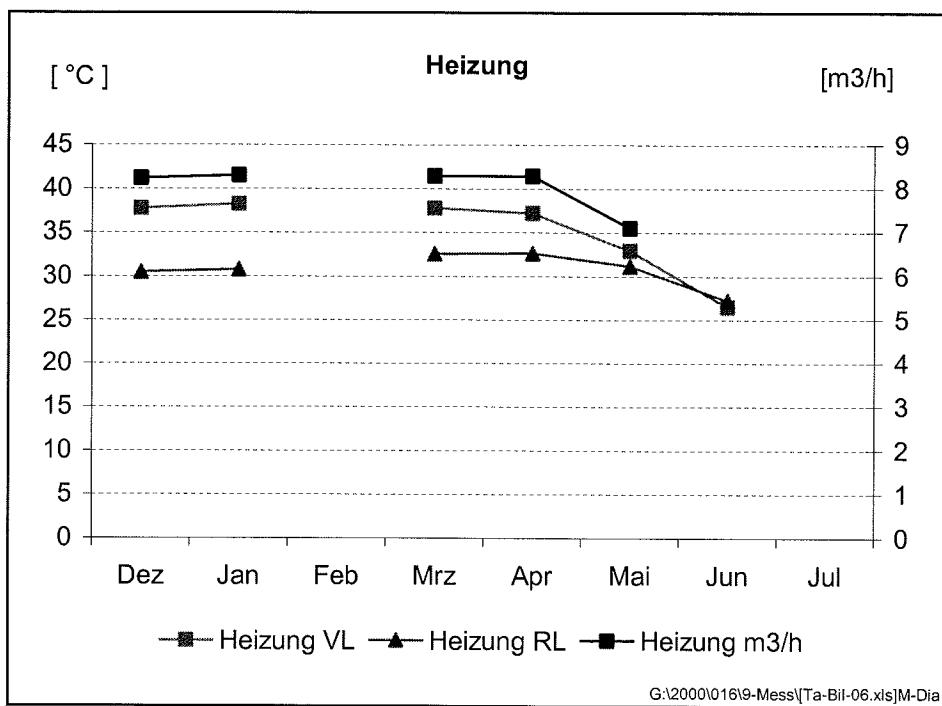


Bild 24

Die mittlere Temperaturspreizung auf dem Heizungsnetz beträgt rund 8 Kelvin.

A 2 Darstellung Stundenwerte

Nachfolgend werden die mit den Wärmezählern erfassten Stundenwerte dargestellt und kommentiert:

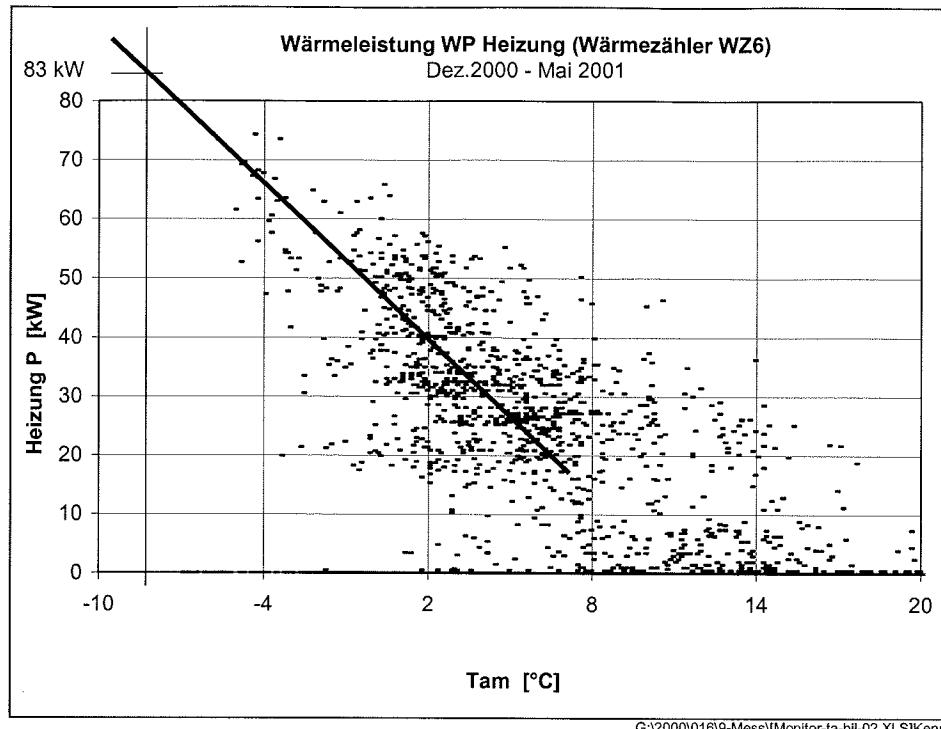


Bild 25

Die erfassten mittleren Wärmeleistungen weisen bezogen auf die jeweilige Außentemperatur eine grosse Streuung auf. Ein Grund kann im differierenden Benutzerverhalten der 19 Wärmebezüger liegen. Der Wärmeleistungsbedarf bei $T_a = -8^\circ\text{C}$ (Auslegung) beträgt im Stundenmittel 83 kW.

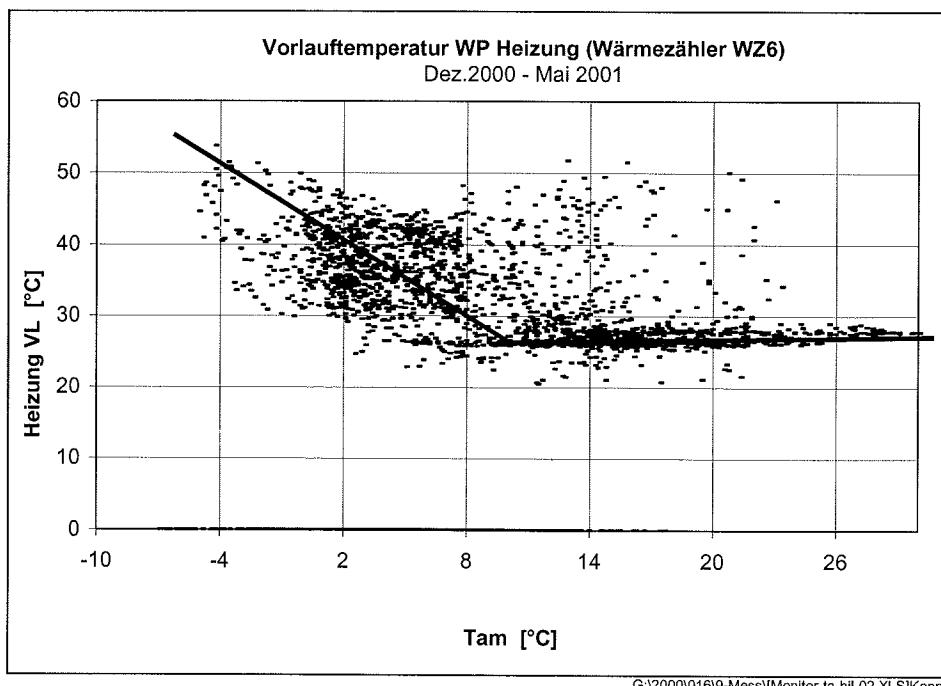


Bild 26

Das gemessene maximale Stundenmittel der Vorlauftemperatur beträgt 54 °C. Über die Heizungsgruppe wird keine Wärme für die WW-Aufbereitung abgegeben, diese erfolgt alleine durch den Unterkühler und den Enthitzer.

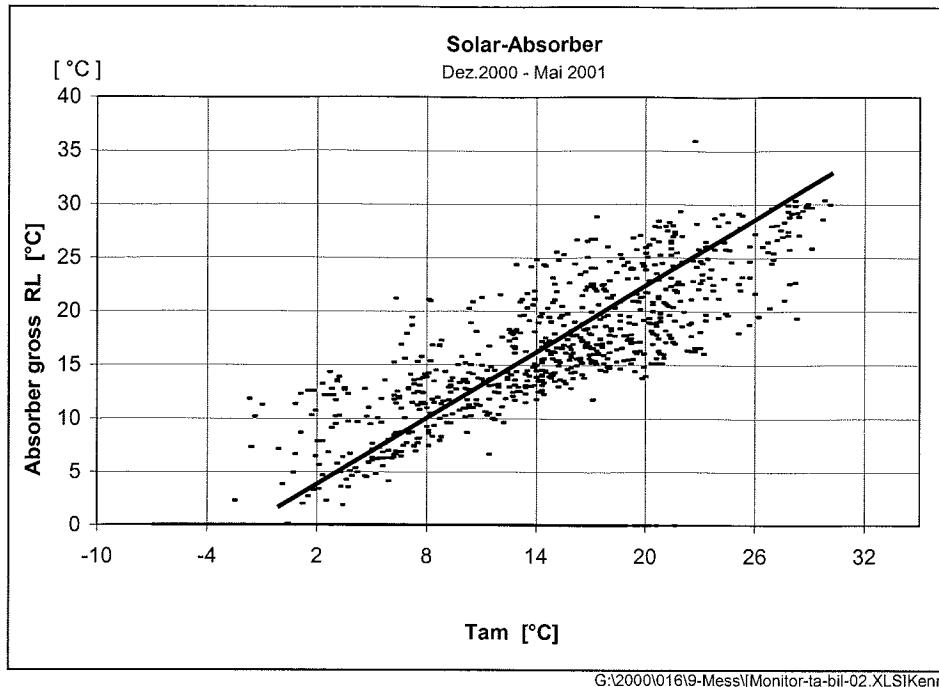


Bild 27

Das Diagramm zeigt, dass die Absorber-Rücklauftemperatur häufig nur wenig über der Außentemperatur oder sogar darunter liegt.

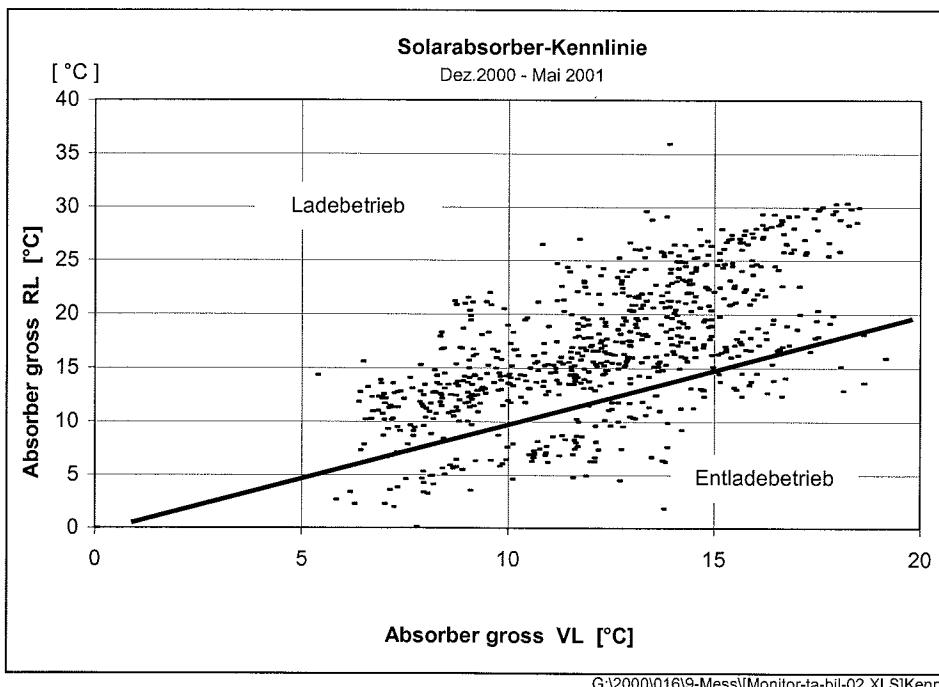


Bild 28

Die Absorber-Kennlinie veranschaulicht, dass über dem Solar-Absorber auch ein Entladebetrieb des Erdkollektors stattfindet. Durch eine effektivere Temperaturbeschaltung der Pumpen ist dies zu vermeiden.

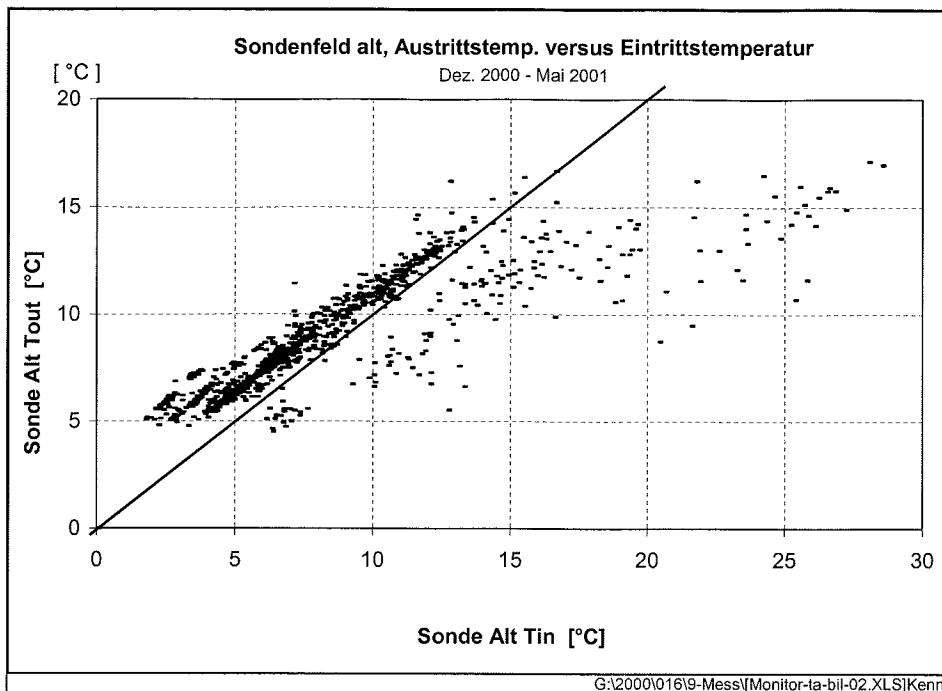


Bild 29

Erwartungsgemäss liegen die ΔT im Ladebetrieb mit bis zu 10 Kelvin deutlich über der Temperaturdifferenz im Entladebetrieb mit rund 3 Kelvin.

Die relativ hohen Ladetemperaturen verringern den Kollektorwirkungsgrad.

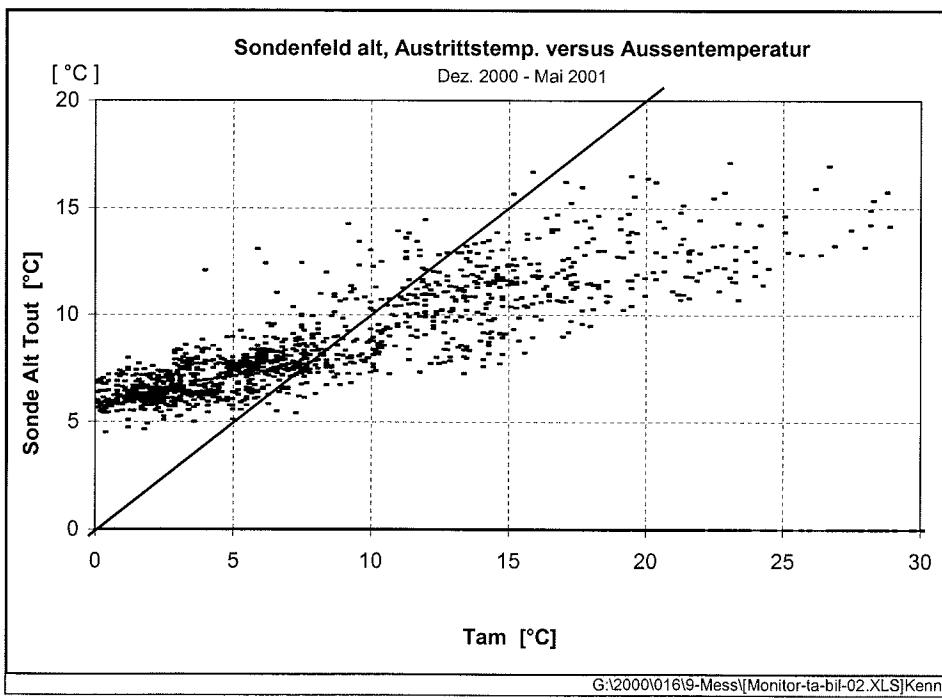


Bild 30

Die Entladetemperatur des Erdsondenfeldes „neu“ liegen nur bei Aussentemperaturen $< 10^{\circ}\text{C}$ deutlich über der mittleren Aussentemperatur. Für die sommerliche WW-Erzeugung liegt die Wärmequellentemperatur deutlich unter der Aussentemperatur.

Die Messpunkte von Bild 30 wiederspiegeln die mit dem EWS-Programm berechneten monatlichen Soletemperaturen (siehe Seite 13).

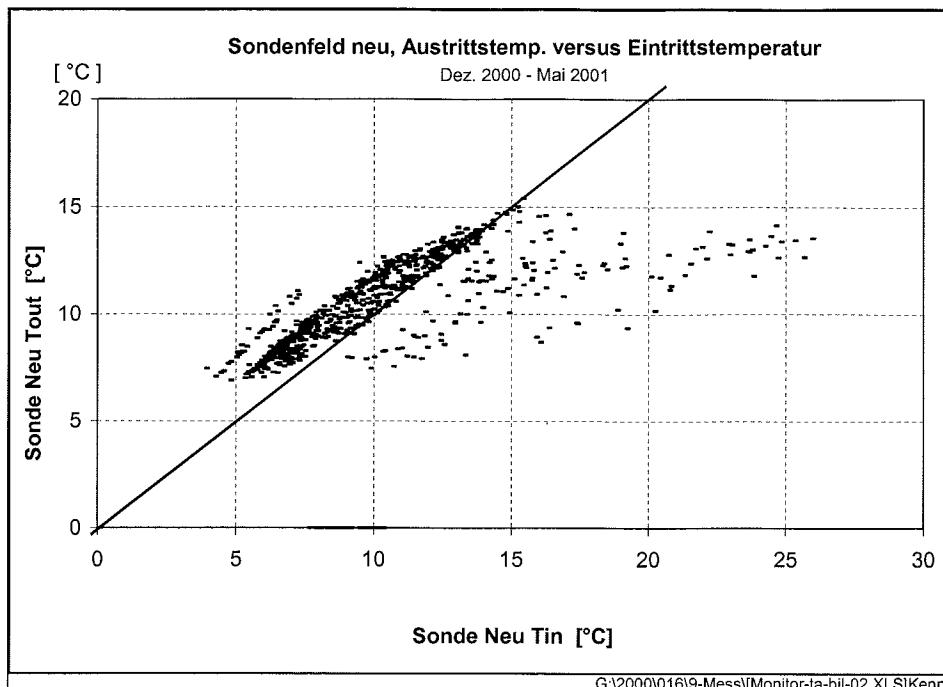


Bild 31

Der Betrieb entspricht je-
nem des Sondenfeldes
„alt“ (siehe vorangehen-
de Seite).

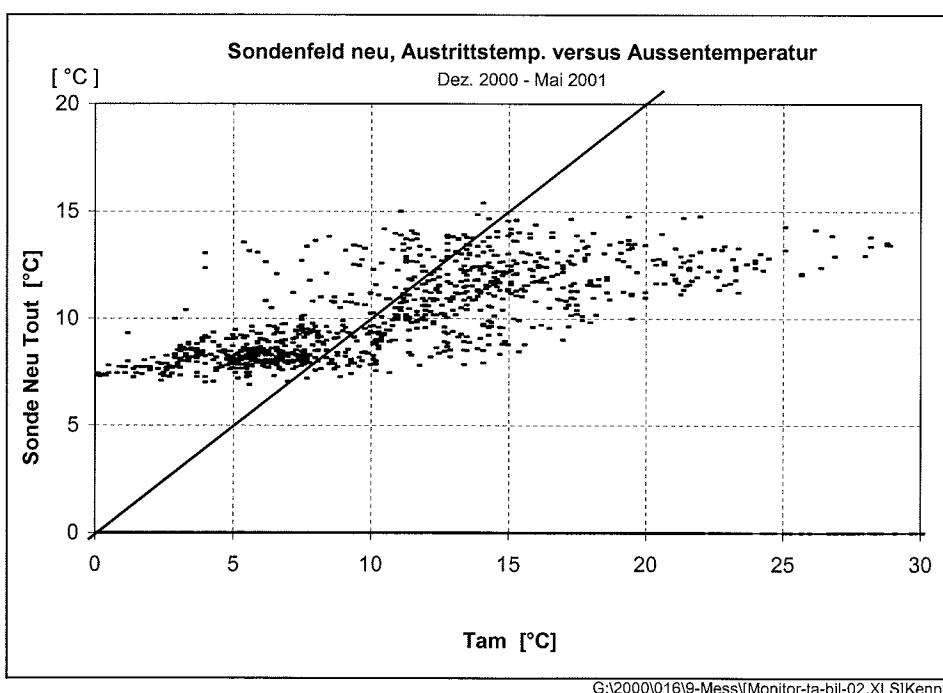


Bild 32

Der Betrieb entspricht je-
nem des Sondenfeldes
„alt“ (siehe vorangehen-
de Seite).

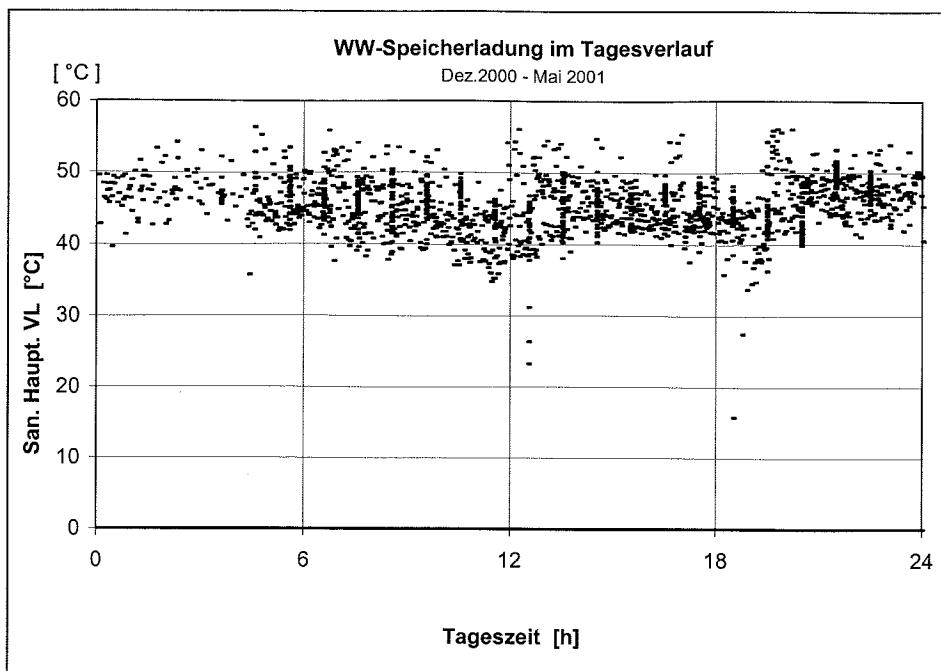


Bild 33

Ein signifikanter Temperaturanstieg über den Tagesverlauf zur WW-Aufbereitung kann nicht festgestellt werden.

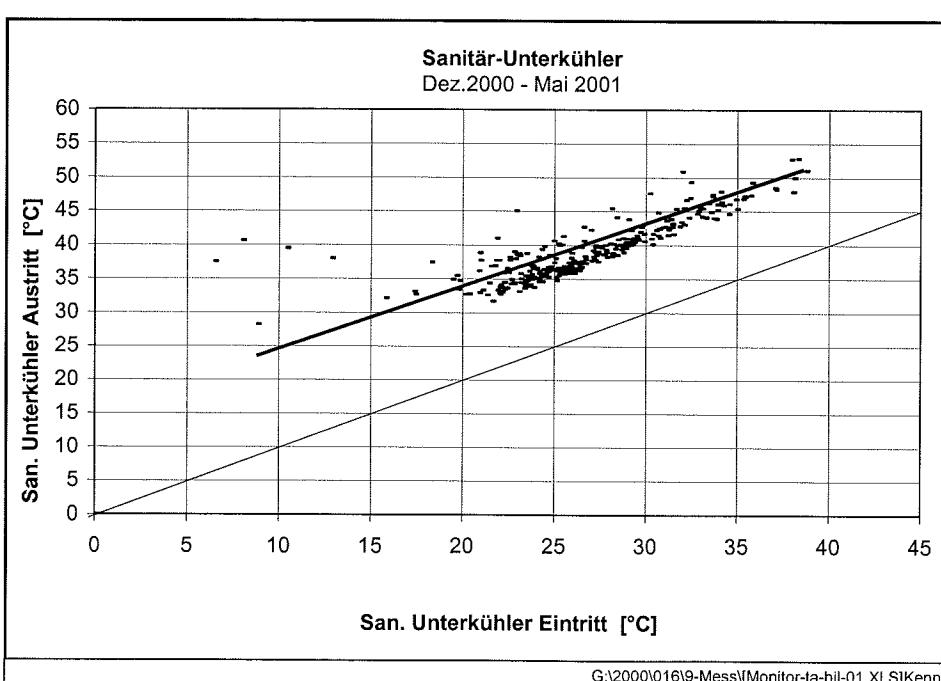


Bild 34

Der Sanitärunterkühler weist ein ΔT von rund 10 Kelvin aus. Verbunden mit der geringen gemessenen Wärmeleistung wurde auf eine starke Verkalkung geschlossen.

A 3 Bodenprofile

Bohrung März 1995 (koaxial) 7x100 m

Datum : 01. - 14. 03. 95 Auftrag Nr. 94158				GEOTEST GEOLOGEN INGENIEURE GEOPHYSIKER UMWELTFACHLEUTE	
Objekt : Neubau Ueberbauung Löhlistrasse, 3127 Mühleturnen				Erdsonden Mühleturnen	
Unternehmung : KWT, Belp				(Bohrung Nr. 1)	
Bohrmethode : Drehschlag					
Anfangsdurchmesser : 152 mm Enddurchmesser : 127 mm					
Koordinaten : 605.150 / 184.600					
Terrainkote : ca. 955 m ü. M. Pm : m ü. M.					
Hydro	Tiefe	Profil	Proben	Materialbeschreibung	Bemerkung, Versuche
					Geol. Interpretation
	1 : 500				
	4.00			Siltiger Kies, leicht tonig, hellbraun Kieskomponenten gut gerundet	Moräne (Würm)
	8.00			Feinsandstein mit Karbonatmatrix, dunkelgrün - grau	
	16.00			Nagelfluh, bunt, Komponenten : weisser Quarzit, brauner mikritischer Kalkstein, heller Orthogneis, Epidotite, wenig grün - grauer Feinsandstein	
	34.00			Siltstein - Feinsandstein, weich, grau	
	48.00			Feinsandstein mit Karbonatmatrix, dunkelgrün - grau 36 m : Gerölllage 36 - 38 m : } silzig 40 - 42 m : }	
	60.00			Wechsellagerung von Feinsandstein, dunkelgrün - grau und Nagelfluh, bunt, Komponenten wie 8 - 16 m	Obere Meeresmolasse (Burdigalien)
	78.00			Nagelfluh, bunt, Komponenten wie 8 - 16 m, gegen unten Grobsandsteinlagen	
	82.00			Feinsandstein, dunkelgrün, mit reichlich Hellglimmer	
	100.00			Nagelfluh, bunt, Komponenten wie 8 - 16 m, gegen unten Lagen von Feinsandstein, grau - grün	
				Gemäss Bohrrapport : Bohrkleinproben alle 2 m Bohrung trocken Kein Spülverlust, kein Gaszutritt, keine Kavitäten, keine besonderen Vorkommnisse	
				Aufgenommen durch : Wa.	Anhang

Bild 35

Bodenprofil des „alten“
Sondenfeldes mit Koaxialsonden.

Bohrung März 2000 (duplex) 3x 270m

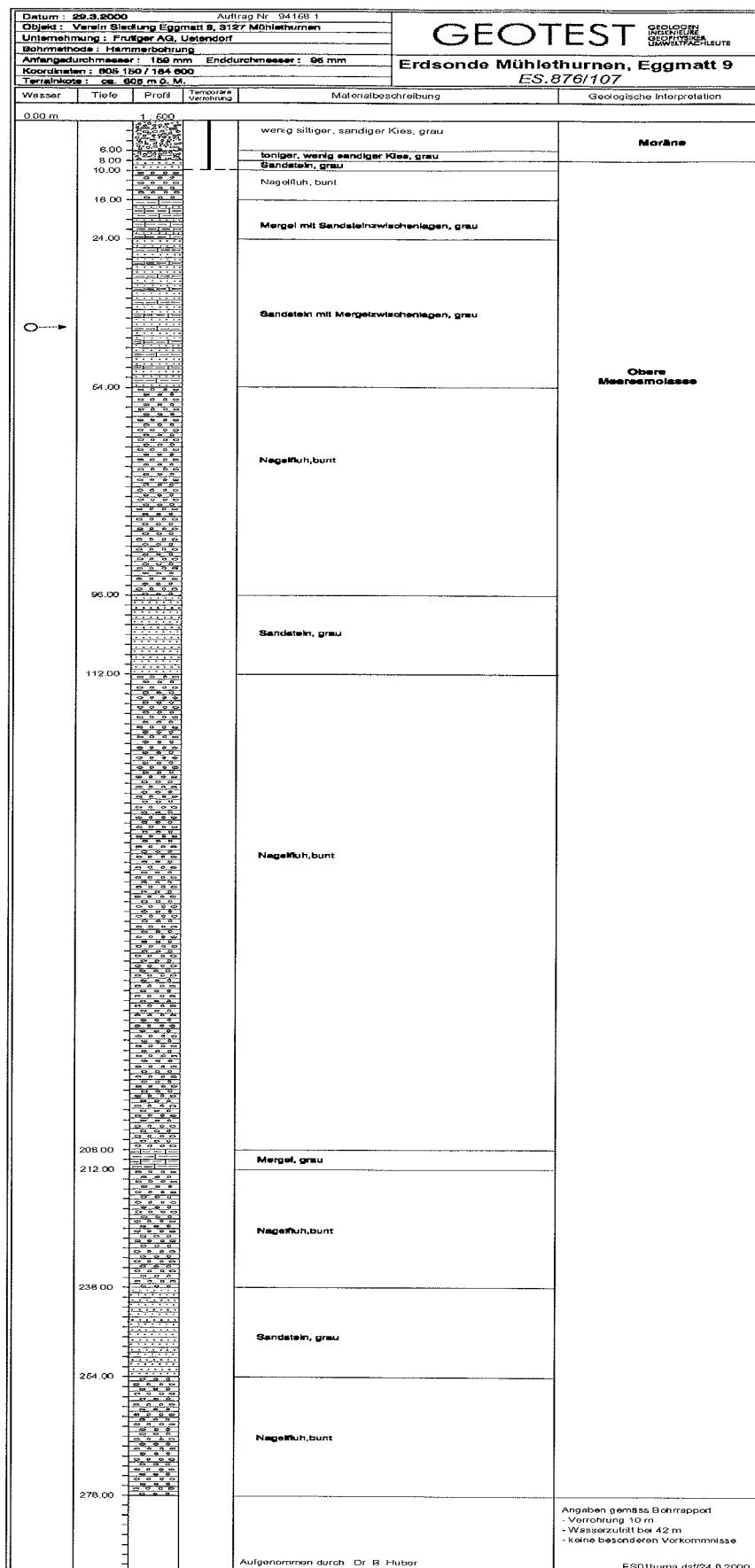


Bild 36

Bodenprofil des „neuen“
Sondenfeldes mit
Duplexsonden.

A 4 Entkalkungs-Systeme

Der Warmwasserbedarf beträgt rund 1'650 Liter pro Tag.

Das Frischwasser der Wohnsiedlung Eggmatt ist stark Kalkhaltig. Ausserhalb der Aufgabenstellung wurde für die Entscheidungsfindung „Entkalkungssystem Ja/Nein“ für die Bewohner folgende Zusammenstellung erstellt:

System Kriterium	CO2	Ionen- austausch	Impuls- Frequenz	„Zauberstab“
Physik	Kalk bindet sich an CO2	Ladung der Ionen werden verändert	Zerstörung der Kalkstruktur durch Frequenz	?
Inhibitor	CO2	NH3	keine	keine
Unterhalt	CO2 nachfüllen, Elektrobedarf	NH3 nachfüllen, Elektrobedarf	Elektrobedarf	keiner
Vorteile			Abbau bestehender Ablagerungen	
Nachteile/Risiken	Korrosion, "spätere" Ablagerungen möglich			Erfolg NICHT garantiert
Kosten- Anschaffung		7'000.- (4'000.-+3'000.-)		
Kosten-Unterhalt		150.-/a		

Enthärtung auf 12°fH

300 kg /a a -.50/kg

A 5 Erfahrungswerte zur Grobdimensionierung

Erfahrungswerte zur «Grobdimensionierung» einer Erdwärmesonden-Anlage in unterschiedlichen Gesteinsarten. Die Werte gelten nur für das Schweizer Mittelland, wobei mit maximal 1800 Jahresbetriebsstunden gerechnet wird. Sie können aufgrund der Meereshöhe und der lokalen Gesteinsausbildung wie Klüftung und Verwitterung erheblich abweichen.

(JAZ = Jahresarbeitszahl)

Untergrund	Wärmeleitfähigkeit (W/m K)	Spezifische Entzugsleistung (W/m)	Erdwärmesondenlänge pro kW Heizleistung (m)	
			JAZ = 3	JAZ = 3,5
Schlechter Untergrund (trockenes Lockergestein)	kleiner 1,5	20	33	36
Festgesteine oder wassergesättigte Lockergesteine	1,5 bis 3,0	50	13	14
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit	grösser 3,0	70	9,5	10
Kies, Sand, trocken	0,4	kleiner 20	grösser 33	grösser 36
Kies, Sand, wasserführend	1,8 bis 2,4	55 bis 65	10 bis 12	11 bis 13
Ton, Lehm, feucht	1,7	30 bis 40	17 bis 22	18 bis 24
Kalkstein, massiv	2,8	45 bis 60	11 bis 15	12 bis 16
Sandstein	2,3	55 bis 65	10 bis 12	11 bis 13
Granit	3,4	55 bis 70	9,5 bis 12	10 bis 13
Basalt	1,7	35 bis 55	12 bis 19	13 bis 20
Gneis	2,9	60 bis 70	9,5 bis 11	10 bis 16

A 6 Erdspeicher

Der periodische Zyklus von Laden und Entladen ermöglicht die kombinierte Anwendung der Erdspeicher für Heizung und Klimatisierung. Im Winter wird dem Erdspeicher Wärme entzogen, die mittels einer Wärmepumpe für Heizzwecke verwendet werden kann. Im Sommer nutzt man die relativ tiefen Temperaturen des Erdspeichers zur Klimatisierung, wodurch der Erdspeicher wieder aufgeladen wird.

Das Erdreich besitzt generell sehr gute thermische Eigenschaften zur Speicherung von Wärme. So beträgt seine Wärmekapazität $0,42 - 0,78 \text{ kWh/m}^3 \text{ K}$ und seine Wärmeleitfähigkeit $1 - 3 \text{ W/m K}$.

SAISONALER ERDSPEICHER

Der Wärmespeicher besteht aus vertikalen Rohren, die entweder in Bohrungen abgesetzt oder direkt ins Erdreich gerammt werden. Die Rohre sind in Serie oder parallel geschaltet.

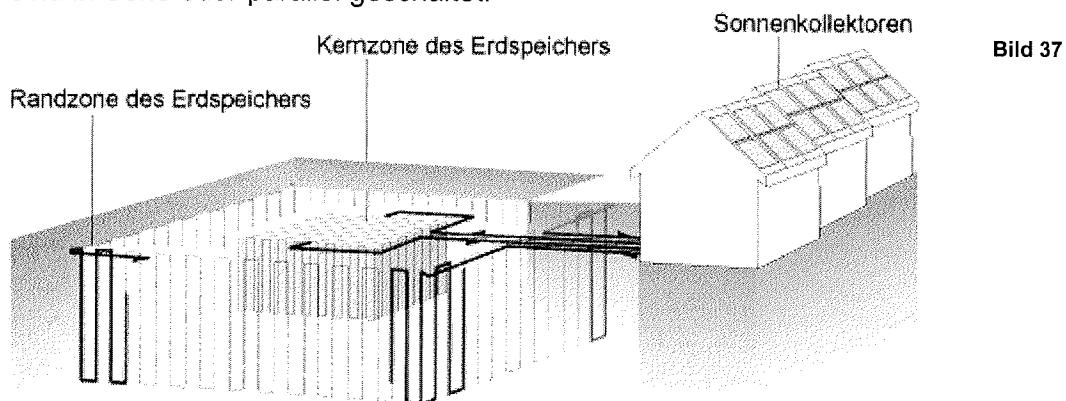


Bild 37

"Diffusive Speicher" nutzen den wassergesättigten oder trockenen Boden. Mit Hilfe von Sonnenkollektoren wird über Erdwärmesondenfelder Solarwärme im Boden gespeichert. In der Schweiz benötigt man für einen saisonalen Speicher ein Bodenvolumen von 3 m^3 bis 5 m^3 pro m^2 Sonnenkollektorfläche. An Stelle von Sonnenenergie kann auch Abwärme von Industriebetrieben verwendet werden. Die Sondenabstände können je nach Bodenverhältnissen und Nutzanwendung zwischen 2 m und 6 m variieren. In der gleichen Art können auch Energiepflanlagen als Wärme- und Kältespeicher genutzt werden.

WÄRMESPEICHERUNG: EINFLUSSFAKTOREN

- Verhältnis Oberfläche zu Volumen des Speichers: Je kleiner das Verhältnis, desto weniger Wärme geht verloren.
- Mittlere Temperatur des Speichers: Je höher die Temperatur des Erdspeichers im Vergleich zu seiner Umgebung ist, desto mehr Wärme geht verloren.
- Wärmedämmung: Eine künstliche Dämmsschicht ist bei Erdspeichern in Tiefen bis zu 20 m notwendig.