

Forschungs- und Beratungszentrum
für Maschinen- und Energiesysteme e.V. (FBZ)
An- Institut an der Hochschule Merseburg (FH)



An-Institut FBZ, c/o Hochschule Merseburg (FH), Geusaer Straße, D-06217 Merseburg
Tel: 03461-462510, Fax: 03461-462514, e-mail: info@fbz-merseburg.de, Internet: www.fbz-merseburg.de

Abschlussbericht

**Durchführung von Versuchen am Teststand im Rahmen
des Projekts**

„Unverglaste Metalldach-

Sonnenkollektoren in

Wärmeversorgungssystemen:

Systemkonzepte und Auslegung“

(UMSys)

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU

von

**Prof. Dr. Hans-Peter Picht, Dipl.-Ing. (FH) René Beyer
und Kay Neumann**

**Auftraggeber:
Rheinzink GmbH & Co. KG
Bahnhofstr. 90
45711 Datteln**

Merseburg, September 2008

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
1 EINLEITUNG	3
2 ZIELSETZUNG UND UMFANG DER UNTERSUCHUNGEN	4
3 QUICK STEP® METALLDACHKOLLEKTOREN	5
3.1 Vergleich möglicher Systemkonzepte	6
4 WP-ANLAGENSTRUKTUR AM VERSUCHSSTAND	10
4.1 Angaben zum Versuchsstand	10
4.2 Erdsondenkreis	11
4.3 Heizkreise	12
4.4 Regelung	12
5 UNTERSUCHUNGEN	17
5.1 Kollektorertrag	17
5.2 Überprüfung der Theorie	30
5.3 Verhalten der Erdwärmequelle	39
5.4 Einfluss der Pumpen auf die Energieeffizienz des WP-Systems	44
6 ERARBEITUNG EINFACHER DIMENSIONIERUNGSEMPFEHLUNGEN	55
6.1 Kollektorertrag	56
6.2 Reduzierung der Erdsondentiefe	57
6.3 Größenverhältnis Erdsondenlänge zu Kollektorfläche	59
6.4 Vollständige Regeneration der Erdsonde	60
7 ZUSAMMENFASSUNG ZUR SIMULATION EINFAMILIENHAUS	62
7.1 Wetter	63
7.2 Zusammensetzung des Energieaufkommens, Simulation EFH	63
7.3 Gesamtenergiebilanz	68
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	71
9 ANHANG	74
9.1 Symbol- und Indizesverzeichnis	74
9.2 Auslegungsempfehlungen des ISFH Hameln	76
9.3 Abbildungsverzeichnis	78
9.4 Diagrammverzeichnis	78
9.5 Tabellenverzeichnis	79
9.6 Literatur und Quellenverzeichnis	79
9.7 Weitere Grafiken, Diagramme und Tabellen	82

1 Einleitung

In Wärmeversorgungssystemen bietet es sich an, Teile der Gebäudehülle für die Absorption von Wärmeenergie zu nutzen. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Metalldach-Sonnenkollektoren. Unverglaste Kollektorsysteme wandeln nicht nur die solare Einstrahlung in ein nutzbares Temperaturniveau um, sondern entziehen auch der Umgebung Wärme durch Konvektion und Kondensation.

Die erreichbaren Vorlauftemperaturen von Metalldachkollektoren liegen allerdings deutlich unter denen verglaster Systeme und sind häufig nicht direkt nutzbar. Vorteilhaft ist daher die Erhöhung des Temperaturniveaus mittels Wärmepumpenanlage.

Herkömmliche WP-Anlagen nutzen überwiegend das Erdreich als erneuerbare Wärmequelle. Dazu werden vertikal oder horizontal Kunststoffrohre in den Boden eingebracht, durch die das Wärmeträgerfluid transportiert wird. Im Laufe einer Heizperiode findet eine Abkühlung des Erdreichs statt, was im Laufe der Betriebsjahre negativen Einfluss auf die Effizienz der WP hat und zu steigenden Betriebskosten der Anlage führt (Diagramm 1)

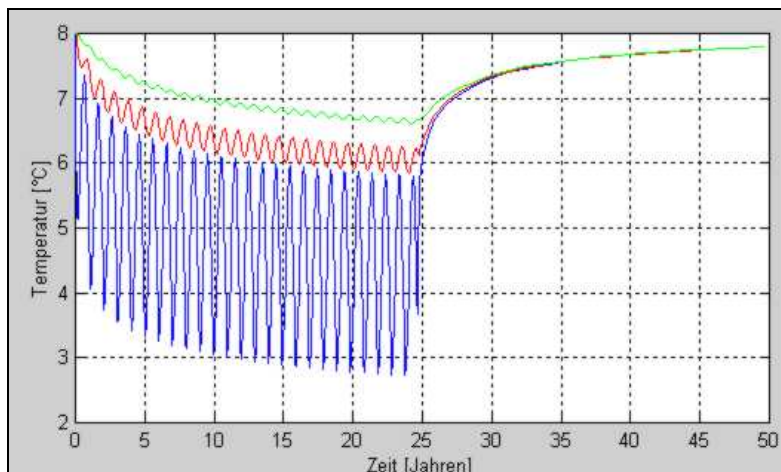


Diagramm 1 Langzeit-Temperaturverlauf im Erdsondenbereich durch WP-Betrieb [10]

Mit Hilfe der Energie vom Metalldachkollektor soll eine langsamere Abkühlung in den Wintermonaten und schnellere (möglichst vollständige) Regeneration des Erdreichs in den Sommermonaten erzielt werden. Die regenerativen Energieträger Erdwärme und solare Einstrahlung ergänzen sich dabei optimal. So führt es zu einer Verbesserung des Anlagenwirkungsgrades und Senkung der Betriebskosten. Gleichzeitig kann eine Reduktion der Sondengröße angedacht werden, so dass im Einzelfall auch die Investitionskosten sinken.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden dazu am Forschungs- und Beratungszentrum für Maschinen- und Energiesysteme e.V. (FBZ) in Merseburg die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen an einem erdgekoppelten Wärmepumpensystem in Verbindung mit einem Metalldachkollektor durchgeführt.

2 Zielsetzung und Umfang der Untersuchungen

Im Rahmen des Projektes sollen Aussagen über eine effiziente Anlagenstruktur, der Dimensionierung der Kollektorfläche und Ertragsabschätzungen aufgrund von Praxiswerten getroffen werden.

Ziele der Versuche am Teststand waren:

- die Untersuchung der Erträge des Absorbers für unterschiedliche Wetterbedingungen
- die Vereisung der Absorber und Ermittlung von zulässigen Grenztemperaturen zur Verhinderung von Eisansatz
- die Ertragsermittlung der Anlage für den simulierten Heizwärmebedarf eines Einfamilienhauses
- Untersuchung von unterschiedlichen Regelstrategien in Bezug auf den Kollektorertrag
- Erarbeitung von Dimensionierungsempfehlungen

3 QUICK STEP[®] Metaldachkollektoren

Unverglaste Metaldachkollektoren sind in der Lage die direkt als auch indirekt einfallende Strahlungsenergie und die Umgebungsluft als Wärmequelle zu nutzen.

Die zu den Untersuchungen eingesetzten QUICK STEP[®] Solarkollektoren sind modular aufgebaut und können zu Systemen bis 9 Paneelen zusammengefasst werden. Mit einer Länge von 3m und einer Deckfläche von 1,1m² entsprechen die Module genau der Dacheindeckung des RHEINZINK[®] Treppendachs.

Der am Versuchsstand installierte Kollektor ist auf der sichtbaren Zinkoberfläche „schiefergrau vorbewittert“ ausgeführt, mit folgenden thermischen Kennwerten:

Konversionsfaktor η_{Konv}	Wärmeverlustkoeffizient $\alpha_{\nu, \text{ bei } 0,2 \text{ m/s}}$	Stillstandstemperatur $T_{\text{Koll-max}}$	$\dot{Q}_{\text{Koll-max}}$ (bei 2m/s, $\Delta T=10\text{K}$, 1000W/m ²)
0,54	14,78 W/m ² K	90°C	400W

Tabelle 1 Thermische Kennwerte der Solarmodule [4]

Eine selektive Beschichtung der Aperturfläche zur Erhöhung des Konversionsfaktors wäre energetisch sinnvoll, allerdings aus wirtschaftlichen und ästhetischen Gründen nicht vertretbar.

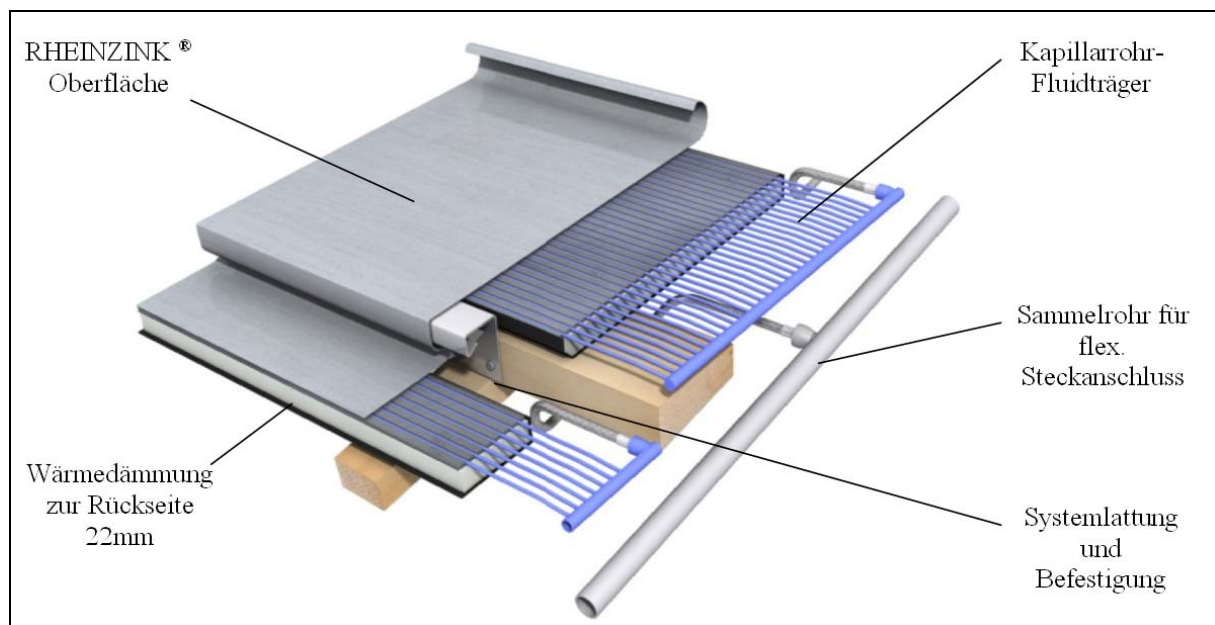


Abbildung 1 Kollektoraufbau [4]

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau der Solarthermie-Paneele und ihr Anschluss an den Solarkreislauf. Das Zinkblech ist mechanisch und chemisch stabil, dient gleichzeitig als Gebäudehülle und Aperturfläche. Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit kann eine effektive Übertragung der Wärmeenergie erfolgen. Über Sammelleitungen wird dazu das kalte Fluid zum Kollektorrücklauf geführt. Auf der Blechrückseite sind Kunststoff-Kapillarrohmatten verklebt, die dachseitig isoliert sind um Wärmeverluste zu reduzieren. Über diese wird die Wärme des Zinkblechs an das durchströmende Solarfluid abgegeben. Das Wärmeträgermedium ist ein Gemisch aus Wasser und Propylenglycol als Frostschutzmittel. Als Massestrom wird von RHEINZINK® 50 kg/h*m² empfohlen.

3.1 Vergleich möglicher Systemkonzepte

Die Anwendung unverglaster Metalldachkollektoren für die Temperierung von Gebäuden kann in Deutschland aufgrund der klimatischen Gegebenheiten nur in Verbindung mit einer Wärmepumpe und zweiter Wärmequelle erfolgen. Ein direkter 100%iger Kollektorbetrieb wäre unwirtschaftlich und kann auch nicht für den Ganzjahresbetrieb garantiert werden. Ergänzend bietet sich aber das Erdreich als regenerativer Energieträger und/oder temporärer Wärmespeicher sehr gut an.

Für die Koppelung der drei Komponenten Kollektor, WP und Erdsonde sind zahlreiche Varianten denkbar, individuell an die jeweilige Gebäudekonfigurationen angepasst (zusätzlicher Kühl-, Schwimmbad- oder Warmwasserbetrieb, etc.).

Bei den Untersuchungen wurde sich allerdings auf eine minimale Anlagenstruktur beschränkt. Dabei sind zwei grundsätzliche Optionen denkbar, Parallelschaltung oder serielle Kopplung der Wärmequellen. Die parallele Variante findet am Versuchsstand Anwendung, während man am ISFH die Reihenschaltung von Kollektorfeld und Erdsonde bevorzugt.

Die Reaktion auf schnelle Kollektorleistungsänderungen und die Ausnutzung des Speicherverhaltens der Erdsonde ist dabei unterschiedlich. Hydraulische Besonderheiten (Volumenstrom, Druckverlust) sind genauso zu berücksichtigen, wie die Auslegung der Regel- und Stelleinrichtungen um der WP ein optimales Temperaturniveau zur Verfügung zu stellen.

3.1.1 Schema Kollektor-Erdsonden Reihenschaltung mit Umschaltventil

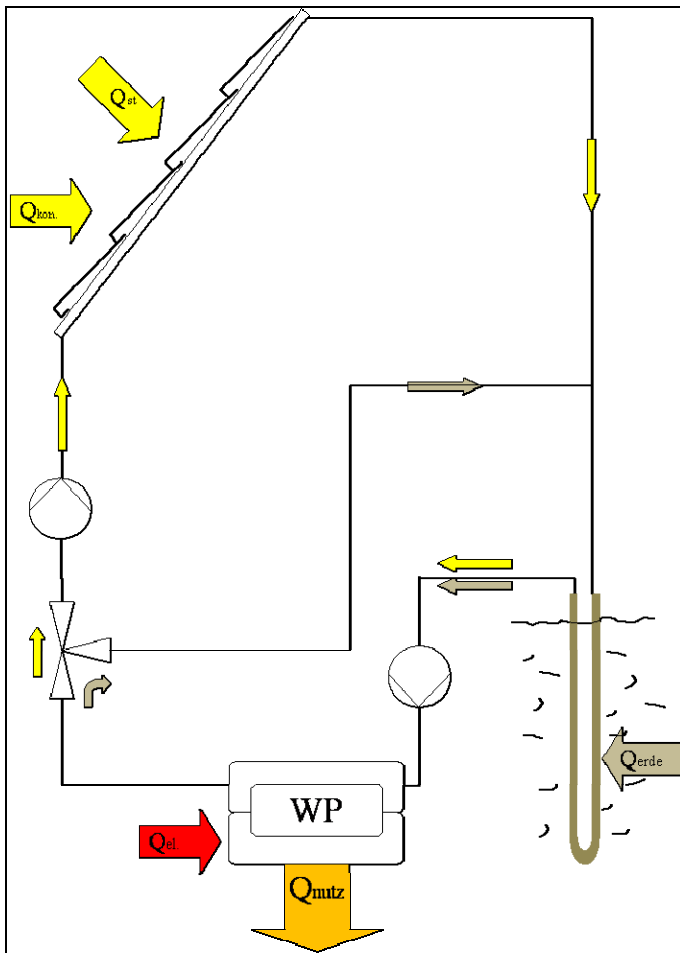


Abbildung 2 Systemlösung Reihenschaltung der WQA mit Umschaltventil

Diese Variante zur Koppelung von Metalldachkollektor und Erdsonde besteht aus einer Reihenschaltung der beiden WQA im kombinierten Betrieb und bei Erdsondenbeladung. Bei ausreichender Kollektorfluidtemperatur wird das vom Verdampfer kommende abgekühlte Fluid über das offene Umschaltventil dem Kollektor zugeführt. Der Volumenstrom verteilt sich durch die Tichelmann-Verrohrung gleichmäßig auf die Kapillarrohre und verlässt den Kollektorvorlauf auf einem höheren Temperaturniveau Richtung Erdsonde. Hier wird durch Wärmeübertragung ein Teil der Energie an das Erdreich abgegeben (Regeneration der Erdsonde) und über die Umwälzpumpe dann der WP zugeführt. Dadurch ist gewährleistet, dass dem Verdampfer über den Wärmetauscher kein unzulässig hohes Temperaturniveau angeboten wird.

Bei unzureichendem Kollektorenergieangebot ($T_{Koll.} - T_{WP-Prim-VL} \leq x$, wobei x von der Rohrlänge, Isolierung, etc. abhängt) wird das Umschaltventil geschlossen und der Fluidstrom so geleitet, dass ausschließlich der Erdsonde Wärme entzogen wird. Dabei wird die

Solarkreispumpe außer Betrieb gesetzt, so dass sich der Elektroenergieverbrauch insgesamt verringert.

Vorteile des Systems:

- kostengünstigstes System
- wenige Komponenten, hohe Betriebssicherheit
- einfacher Aufbau, Überschaubarkeit, leichte Fehlersuche

Nachteile dieses Systems:

- Das gesamte Fluid muss durch den Kollektor gefördert werden. Der Einsatz eines Überstromventils parallel zum Kollektor ist daher meist notwendig, welches aber auch energetische Verluste verursacht.
- Aufgrund der Reihenschaltung beider WQA und die damit verbundenen hohen Druckverluste im System müssen die Pumpen entsprechend groß dimensioniert werden
- Wegen der zyklischen Abschaltung des Kollektorkreises durch die 2-Punktregelung wird die zur Verfügung stehende Energie nicht optimal ausgenutzt. Stillstandszeiten lassen sich durch ein geringeres ΔT zwischen Kollektor und Erdsonde minimieren, wobei aber auf eine systemabhängig ausreichende Mindestdifferenz zu achten ist und häufigere Schaltzeiten in Kauf genommen werden müssten.

3.1.2 Schema Versuchsanlage FBZ Merseburg

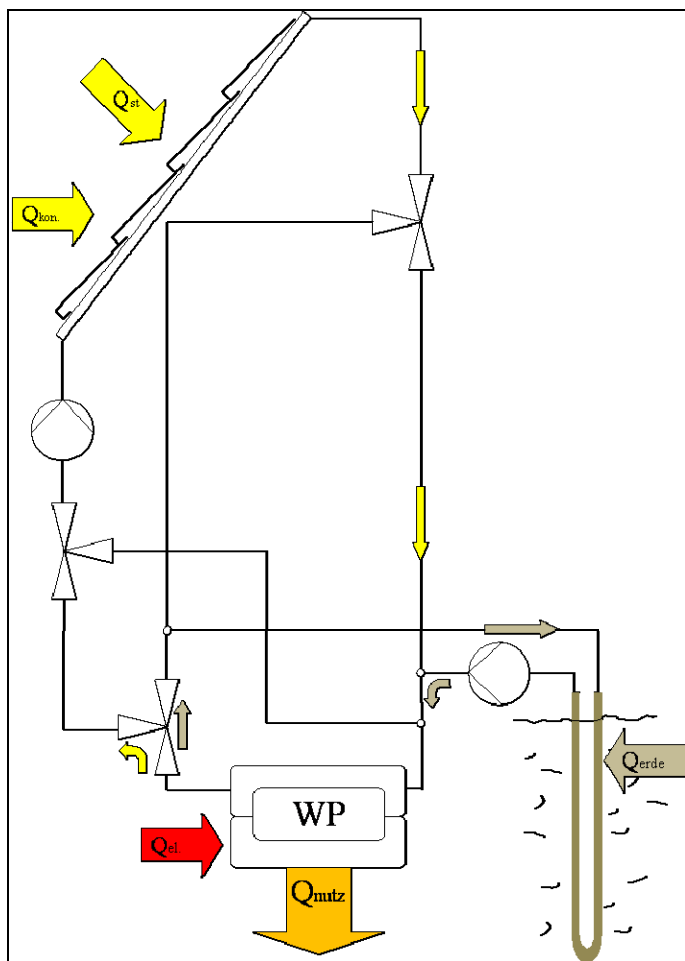


Abbildung 3 Systemlösung am Versuchsstand mit stetiger Volumenstromregelung

Die am FBZ Merseburg vorhandene WP-Altanlage war bereits mit einer stetigen Regelung des Kollektorkreisvolumenstroms ausgerüstet und wurde für das Projekt mehrfach modifiziert und optimiert.

Im Unterschied zu 3.2.1 wird dem primärseitigen Wärmetauscher hier eine Mischtemperatur zwischen Kollektor- und Erdsondenkreis zur Verfügung gestellt, beide Wärmequellen können parallel betrieben werden.

Vorteile:

- Eine optimale Ausnutzung des Solarkollektors, auch bei niedriger Außentemperatur und Einstrahlung, einschließlich Nachtbetrieb ist möglich.
- Bei Erdsondenbeladung wird der Fluidstrom an der WP vorbei geführt, was zu hohe Temperaturen an der Verdampferseite vermeidet und sich gleichzeitig strömungstechnisch sehr positiv auswirkt. In diesem Betriebszustand reicht deshalb die Leistung einer Pumpe um den erforderlichen Volumenstrom zu gewährleisten.

Nachteile:

- höhere Investitionskosten
- aufwändigere Konstruktion, mehr Systemkomponenten nötig
- anspruchsvollere Regeleinrichtung erforderlich
- Einsatz von elektronisch geregelten Pumpen notwendig, da die Volumenströme stark variieren

4 WP-Anlagenstruktur am Versuchsstand

4.1 Angaben zum Versuchsstand

Der vorhandene Wärmepumpenversuchsstand der Hochschule Merseburg (FH) mit angeschlossener 30m tiefer Erdsondenanlage wurde an die spezifischen Anforderungen des Projektes angepasst. Auf dem Gebäude wurde ein Versuchsdach aufgebaut, mit 6 QUICK STEP –Solarthermie- Paneelen, die von der Firma RHEINZINK zur Verfügung gestellt wurden. Die 6 Paneele wurden nach dem Tichelmann-Prinzip mit flexiblen Schläuchen über die mitgelieferten Sammel- und Verteilleitungen angeschlossen.

Die Aperturfläche beträgt ins gesamt $6,6\text{m}^2$. Die Aufstellung des Versuchsdaches erfolgte in einem Anstellwinkel von 45° und einem Azimutwinkel von -30° .

Als Wärmetransportmedium dient ein Wasser (60%) - Tyfocor[®] L (40%) -Gemisch, was ein Frostschutz bis -25°C gewährleistet.

Vor dem Kollektoreinlauf wurde ein zusätzlicher feinmaschiger Schwebstofffilter installiert.

Die Praxis während der Versuche zeigte, dass ein solcher Filter unbedingt erforderlich ist, um ein Zusetzen der Kapillarrohre des Absorbers zu verhindern.

Der Volumenstrom lässt sich in Abhängigkeit der Fluidtemperaturen variabel regeln oder fest einstellen. Volumenströme bis zu 65 l/h m^2 je Absorberfläche wurden untersucht.

4.1.1 Messwertaufnahme

Die Messdatenerfassung erfolgte mit einem Datenerfassungssystem der Fa. Ahlborn Messtechnik.

Am Kollektorfeld sind Sensoren für die Aufnahme der Wetterdaten installiert. Damit werden Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Einstrahlung erfasst.

Die Kollektor Ein- und Austrittstemperaturen werden direkt in den Sammelrohren mittels Pt100-Sensoren gemessen, zur Erfassung des Volumenstromes dient ein magnetisch induktiver Durchflussmesser.

Es gilt für den abgeführten Wärmestrom:

$$\dot{Q} = \rho * \dot{V} * c * (T_{Koll-VL} - T_{Koll-RL}) \quad (1)$$

Da die spezifische Wärmekapazität des Wasser-Glykol-Gemisches eine konzentrations- und temperaturabhängige Größe ist, wurde ein vom Hersteller angegebenes Korrekturpolynom berücksichtigt.

Über die mittlere Kollektorfluidtemperatur errechnet sich die spezifische Wärmekapazität des Solarfluids:

$$c_{P\ Spez} = 3,461 + 0,006154 * T_m - 2,729 * 10^{-5} * (T_m)^2 \quad (2)$$

und die aktuelle Dichte des Mediums ergibt sich aus

$$\rho_{Spez} = 1068,4 - 0,4485 * T_m - (1,3 * 10^{-3})^2 + 2 * 10^{-6} * (T_m)^3 \quad (3)$$

4.2 Erdsondenkreis

4.2.1 Bedingungen

Die Wärmepumpe des Versuchsstandes ist gekoppelt mit einer 30m tiefen Erdsondenanlage, besteht aus 2 U-Rohren, die am unteren Ende mit dem Sondenkopf verschweißt sind.

Die Sole-Wasser Wärmepumpe des Versuchsstandes ist ein Fabrikat der Fa. Neudeck und hat eine Nennleistung von 5KW. Die Pumpe verfügt über einen Compliant-Scrollverdichter, welcher in Abhängigkeit von der Sekundärspeichertemperatur betrieben wird.

Als Arbeitsstoff findet R407C Anwendung. Dieses zeotrope HFKW-Kältemittelgemisch besteht aus 25% R125, 23%R32 und 52%R134a und ist für den Temperaturbereich bis -10°C bis 50°C ausgelegt. Die kritische Temperatur beträgt 86,1°C, der kritische Druck liegt bei 46,2 bar. Als Entspannungsorgan dient ein thermostatisches Expansionsventil.

4.2.2 Messwertaufnahme

Zur Messung der Temperaturverhältnisse während der Versuche wurde im Abstand von etwa 0,5m zur vorhandenen Erdsonde eine 28m tiefe Bohrung eingebracht. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurden die Bohrkerne verschiedener Schichten untersucht.

In das Bohrloch wurden insgesamt 5 Temperatursensoren (in 1m, 2m, 10,5m, 18,5m, 26,5m Tiefe) installiert. Die Energieaufnahme des Verdichters und seiner Sicherheitseinrichtungen über Strom-Spannungswandler dem Datenlogger zugeführt.

4.3 Heizkreise

Der Sekundärkreis ist über einen Wärmetauscher regelungstechnisch und hydraulisch vom WP-System abkoppelt. Eingebunden ist sekundär ein 280 Liter – Pufferspeicher.

Messtechnisch erfasst werden Vor- und Rücklaufemperatur, sowie Volumenstrom mittel Flügelradzähler. Zwei separate Heizstränge versorgen einen Raum mit Fußbodenheizung und 4 Räume mit Wandradiatorenheizung. Beide werden unabhängig voneinander stetig über 3-Wege-Mischventile angeregt. Wärmepumpe

4.4 Regelung

4.4.1 Beschreibung des Regelkonzeptes

Der Wärmeanforderung des Sekundärkreises wird über einen Zweipunktregler geregelt.

Auf Grund der vorhandenen Heizungsanlage und der durch die Gebäudehülle vorgegebene Heizlast wurde die Solltemperatur des sekundärseitigen Heizkreis-Pufferspeichers auf 48°C festgelegt. Das ist ein Grund für den recht hohen COP-Wert der Wärmepumpe.

Diagramm 2 COP in Abhängigkeit von der Sekundärtemperatur zeigt die Entwicklung des COP für eine Schaltsequenz beginnend mit Faktor 4 beim Einschaltvorgang. Mit fortschreitender Beladung sinkt der Wirkungsgrad und erreicht bei WP-Abschaltung einen COP von 2,5. Das Verhältnis kurzer Schalt- und langer Ruhephase zeigt, dass es sich hier um einen Zeitraum niedriger Energieanforderung handelt.

Die eingestellte Hysterese von 4K ist ein über mehrere Betriebsmonate gewonnener Erfahrungswert, welcher einen guten Kompromiss zwischen WP-Schalhäufigkeit und Wärmeanforderung darstellt.

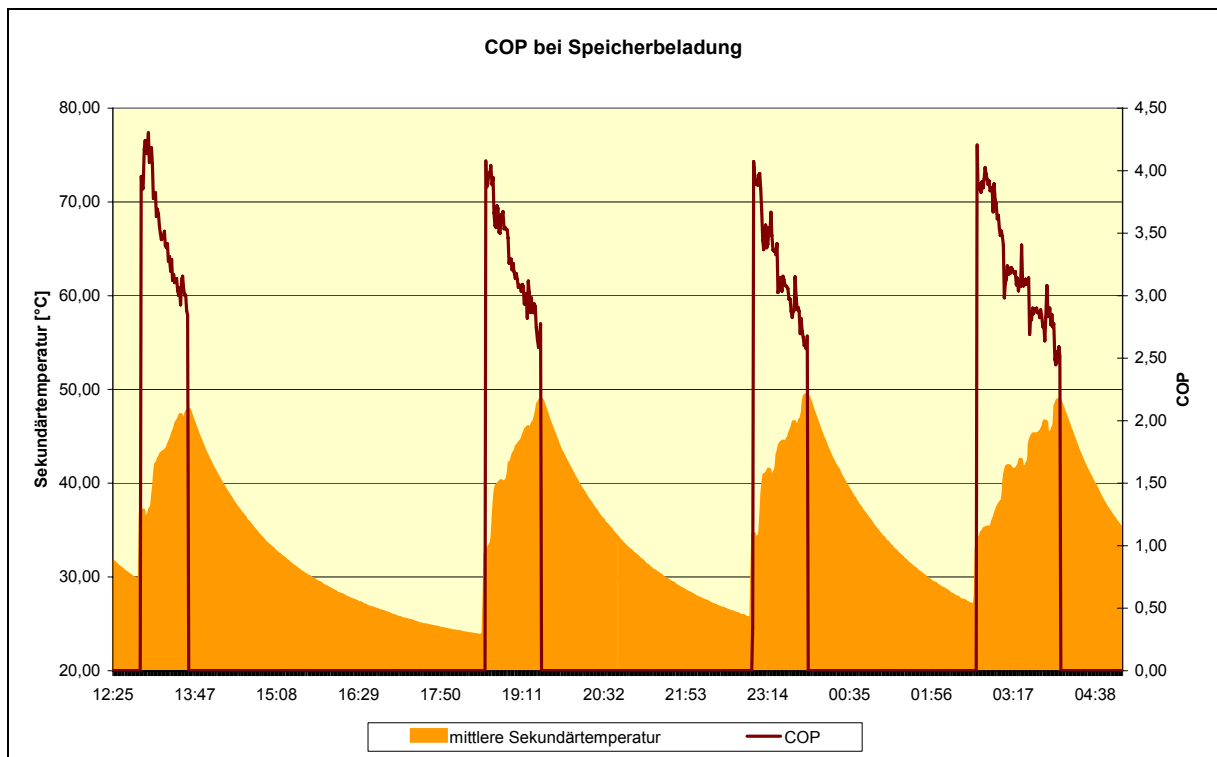


Diagramm 2 COP in Abhängigkeit von der Sekundärtemperatur

Die hier angegebene mittlere Sekundärtemperatur ist nicht gleichzusetzen mit der Speichertemperatur, dafür stand leider keine Messtechnik zur Verfügung. Es handelt sich um den arithmetischen Mittelwert der Sensoren im Vor- und Rücklauf. Bei Abschaltung der WP wird auch der sekundärseitige Volumenstrom unterbrochen, so dass die natürliche Abkühlung der Rohrleitung erfasst wird. Trotzdem wird aus dem Diagramm die Abhängigkeit des COP von der Sekundärseite deutlich.

Es kommt zwischen den einzelnen Schaltzyklen zu Stillstandszeiten des WP-Systems, wenn kein Wärmebedarf vorhanden ist. In diesen Zeiten kann, bei ausreichend verfügbarer Kollektorleistung, die Energie vom Kollektor zur Regenerierung der Erdsonde eingesetzt werden. Hydraulisch günstig zeigte sich dafür eine Vor- und rücklaufseitige Bypassregelung mittels elektrothermisch betriebenen Durchgangsventilen. Dazu kam ein Temperaturdifferenzregler zum Einsatz, welcher Kollektorvorlauftemperatur und Erdsondenvorlauftemperatur erfasst. Das optimale ΔT hierfür hängt wesentlich von der Länge der Rohrverbindung ab und wurde in den Versuchsreihen praktisch ermittelt, siehe Kapitel 5.3.1.

Während die Erdsonde über einen längeren Zeitraum als kontinuierliche Wärmequelle betrachtet werden kann, ist die Energieausbeute im Kollektorkreis starken Schwankungen unterworfen. Der Kollektor weist aufgrund wechselnder Umweltbedingungen (Wetter, Tageszeit) unterschiedliche Ertragskapazitäten auf. Eine schnelle permanente Anpassung an das WP-System ist deshalb erforderlich um der Wärmepumpe primärseitig ein möglichst hohes Temperaturniveau zur Verfügung zu stellen.

Am Versuchsstand kommt eine stetige Volumenstromregelung über ein Dreiwege-Proportionalventil zum Einsatz, welche das Durchflussverhältnis von Kollektor- zu Erdsondenkreis von 0-100% beeinflussen kann. Somit wird der Verdampferwärmetauscher immer mit einer optimalen Fluidtemperatur durchströmt.

Zum Einsatz kommt hierfür ein Regelmodul der Fa. Hartmann&Braun, welches als P-Regler programmiert ist. Vorteilhaft beim P-Regler ist die schnelle Reaktion auf Veränderungen und die Stabilität des Regelkreises (kein Aufschwingen des Systems möglich). Der Nachteil einer bleibenden Regelabweichung bei Störgrößenänderung fällt bei dieser Anwendung nicht ins Gewicht [15]. Diagramm 3 zeigt den typischen Verlauf der Volumenstromregelung über einen Sonnentag.

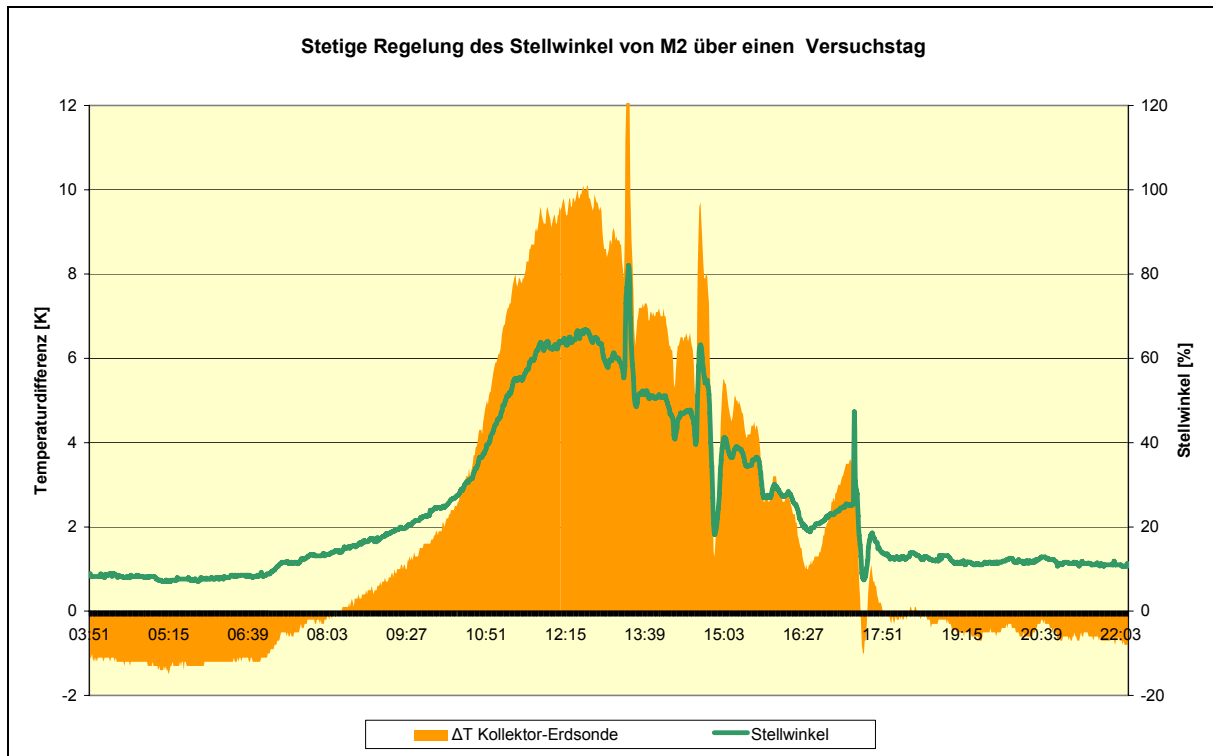


Diagramm 3 Stellsignal in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

Es fällt sofort auf, dass selbst bei negativem ΔT zwischen Kollektorvor- und Erdsondenrücklauf noch ein gewisser Volumenstrom im Kollektorkreis transportiert wird, es wird diesem immer noch ein Wärmepotential entzogen, da der verdampferseitige Wärmetauscher mit noch tieferen Temperaturen betrieben wird. Darin liegt ein Vorteil der stetigen Regelung mit parallel betriebenen WQA, welche dem Primärwärmetauscher eine Mischtemperatur aus Kollektorkreis und Erdsondenkreis anbietet. Optimal wäre das Volumenstromverhältnis im WP-Betrieb von Erdsonden- und Kollektorkreislauf bei gleichen Fluidtemperaturen $T_{ES-VL} = T_{Koll-VL}$ eingestellt. In der Praxis treten jedoch schon Schwierigkeiten bei der genauen Erfassung der Werte auf. Am Versuchsstand wurde zunächst die Kollektoraustrittstemperatur am oberen Ende der der Sammelleitung gemessen. Dies erwies sich als zu träge und ungünstig bei fehlender Kollektorkreisumwälzung.

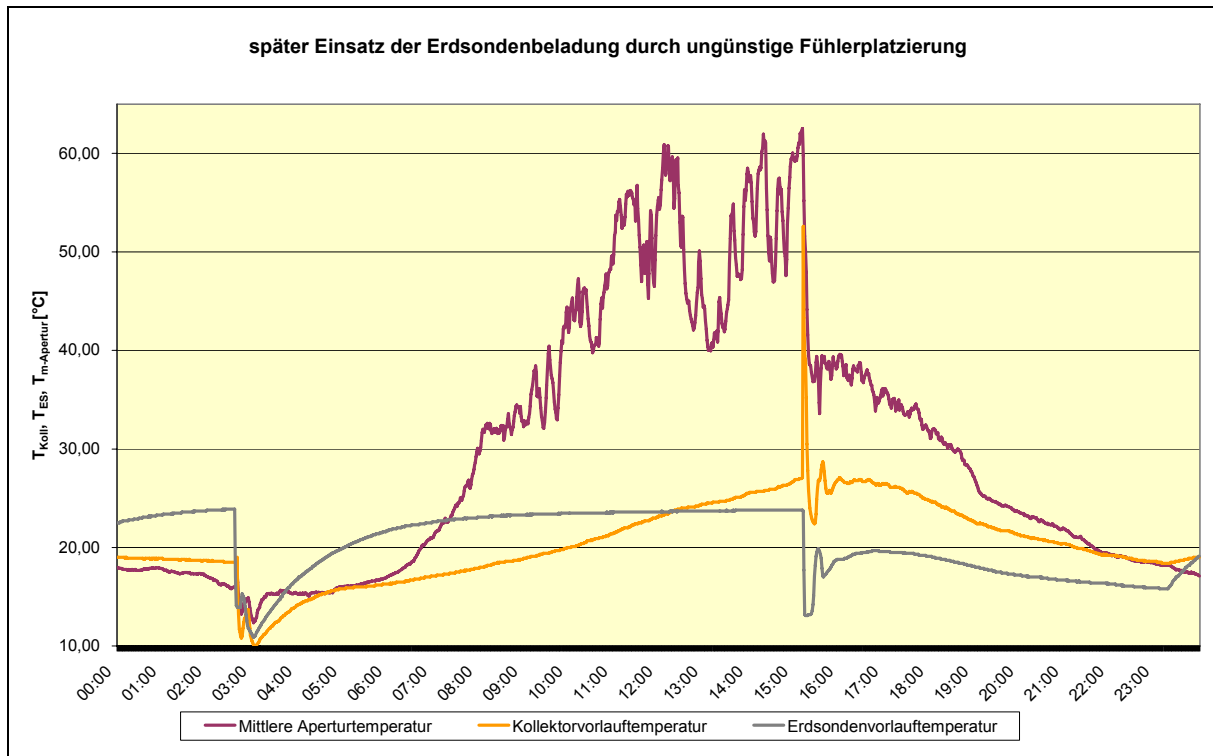


Diagramm 4 suboptimale Erdsondenbeladung durch ungünstige Fühlerplatzierung

Wie Diagramm 4 zeigt setzt eine Beladung der Erdsonde erst am späten Nachmittag ein.

Ursachen dafür sind:

- Rohranlegefühler T_{ES-VL} hat Raumtemperatur aufgrund fehlendem WP-Betrieb
- $T_{Koll-VL}$ liegt nur unwesentlich über T_{AU} , die Erwärmung des Sammelrohrabgangs erfolgt langsam, die erwartete Konvektion des Fluids im Sammelrohr findet (kaum) statt.

Wie auch richtig empfohlen, muss in der Praxis ein Temperaturfühler eingesetzt werden, der zwischen Rohrstamm und Zinkblech platziert werden kann und mit beiden Kontakt hat.

Dieser wird allerdings in der Regel einen etwas höheren Temperaturwert aufnehmen und ist nur für die Überwachung des Erdsondenregenerierungsprozesses praktikabel.

Die suboptimale Fühlerplatzierung führte zu deutlichen Ertragseinbußen bezüglich der Erdsondenregenerierung, gerade in den Sommermonaten, siehe Diagramm 4.

Deshalb wurde der Anlegefühler $T_{Koll-VL}$ entsprechend den Empfehlungen direkt unter dem Zinkblech positioniert. Der Temperaturdifferenzregler spricht dadurch wesentlich früher (in den Vormittagsstunden) an.

Durch kurzzeitiges Einschalten der Pumpen kann der Kollektorertrag sicher noch optimiert werden.

Fazit:

Die variable Volumenstromregelung bietet Ertragsvorteile, ist allerdings auch mit höheren Investitionskosten verbunden.

Um der Verdampferseite im WP-Betrieb ein optimales Temperaturniveau $T_{ES-VL} = T_{Koll-VL}$ anzubieten, sind in Tauchhülsen installierte Sensoren (für Kollektor- und Erdsondenkreis) in unmittelbarer WP-Nähe empfehlenswert. Das erhöht allerdings den Anlagenaufwand, da trotzdem immer ein Temperatursensor am Kollektor notwendig ist um eine optimale Beladung der Erdsonde zu ermöglichen.

Um ein optimales Zuschalten des Kollektors zu ermöglichen und ein Festsetzen der Pumpen zu vermeiden, sollten Erdsonden- und Kollektorkreispumpe einmal täglich für wenige Sekunden in Betrieb genommen werden.

5 Untersuchungen

5.1 Kollektorertrag

Untersuchungen zum Kollektorertrag wurden am ISFH bereits unter Laborbedingungen durchgeführt. Im Gegensatz zu den verglasten Kollektoren, deren Energieausbeute im Wesentlichen von der solaren Einstrahlung abhängt, wird auch ein zusätzlicher Gewinn durch konvektive und kondensative Effekte erwartet. Dazu standen bisher in der Praxis nur wenige aussagefähige Daten und Erkenntnisse zur Verfügung.

Am Versuchsstand des FBZ wurden mit der Simulation eines Einfamilienhauses Praxiswerte ermittelt.

Die witterungsgeführte Heizungssteuerung Honeywell MR200 wurde dazu auf einen Sollwert von 22°C Raumtemperatur in beiden Sekundärkreisen (Radiator und Fußbodenheizung) programmiert, mit einer Nachtabsenkung auf 18°C.

Die Aufnahme aller Messwerte erfolgte zyklisch alle 2s die jeweils zu einem Minutenmittelwert zusammengefasst wurden. Eine durchgehende Dokumentation des Ertrags über die Winterperiode war nicht möglich, da noch andere Versuchsreihen (Kollektorvereisung, Erdsondenabkühlung) durchgeführt wurden. Die Daten wurden daher auf die jeweiligen Zeiten hochgerechnet.

5.1.1 Aufstellung einer empirischen Näherungsformel

Im Gegensatz zu verglasten Kollektorsystemen kann keine eindeutigen Aussagen über die Beziehung zwischen solarer Einstrahlung und Kollektorertrag getroffen werden.

Die Außentemperatur hat natürlich einen entscheidenden Anteil am möglichen Ertrag.

Allerdings war die Streuung der Messwerte insgesamt sehr hoch.

Ziel dieser Untersuchung war eine einfache, vom Praktiker leicht anzuwendende Methode, zur vertretbar genauen Abschätzung des solaren Ertrags zu entwickeln.

Die vielen Einflussgrößen und deren Beziehungen untereinander sowie dem Kollektor gegenüber, besitzen eine sehr große Komplexität. Es wurde daher nach einer empirischen Näherungsformel gesucht.

Um mit möglichst wenig Variablen annähernd korrekte Ertragsaussagen treffen zu können wurde der Kollektorgewinn in dominierende Wärmestromanteile zerlegt und dazu passend mittels linearer Regression Faktoren eruiert. Dazu wird folgendes angenommen:

$$\frac{\dot{Q}_{Koll.}}{A_{Apertur}} \approx \frac{\dot{Q}_{sol.} * \eta_{str.Koll.}}{A_{Apertur}} + \frac{\dot{Q}_{konv.} + \dot{Q}_{kond.}}{A_{Apertur}} \quad (4)$$

Der Einstrahlungswirkungsgrad $\eta_{Str.Koll.}$ ist an Anstellwinkel und Azimut des Kollektors gebunden, daher muss dieser Term zur Verallgemeinerung noch um den Korrekturfaktor $\eta_{Str.Korr.}$ ergänzt werden. Diese Ausrichtungsabhängigkeit wurde bereits vom ISFH für die QUICKSTEP® Kollektorfläche ermittelt, siehe Diagramm 12.

Die kondensativen und konvektiven Ertragsanteile sind direkt von der jeweiligen Wetterlage abhängig und unterliegen starken Schwankungen.

Allerdings sind $\dot{Q}_{konv.}$ und $\dot{Q}_{kond.}$ nicht völlig unabhängig voneinander, beeinflussen sich gegenseitig und sind eng über die Luft- und Oberflächentemperatur der Absorberbleche miteinander verbunden. Daher wurden beide Energieanteile zusammengefasst als:

$$\dot{Q}_{\text{Überg.}} = \dot{Q}_{konv.} + \dot{Q}_{kond.}$$

und mit einem temperaturdifferenzabhängigen Jahresdurchschnittswärmeübergang $x_{Temp.}$ beschrieben. Es wird auf die Aperturfläche Bezug angenommen:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{Überg.}}}{m^2 * a} \approx \frac{x_{Temp.} * (g_{AU} - g_{Koll. RL})}{a} \quad (5)$$

Der Wert von $x_{Temp.}$ ist allerdings nicht konstant, sondern von der aktuellen Wettersituation abhängig. Der Aufwand zur empirischen Ermittlung des $x_{Temp.}$ -Wertes ist hoch, daher wurden die Messwerte nur zu 3 unterschiedlichen Wetterbedingungen selektiert, siehe Tabelle 2. Um eine weitere Variablenreduktion zu erreichen, wurde der Kollektorbetrieb mit einem Volumenstrom von 50l/hm² und 0°C Kollektorrücklauftemperatur betrachtet. Letzteres hat den Vorteil, dass vereinfacht werden kann zu:

$$(\Delta T_{AU \rightarrow Koll-RL}) = g_{AU} \quad (6)$$

Zusammenfassend ergibt sich dann also für die spezifische Kollektorleistung im Jahresdurchschnitt:

$$\frac{\dot{Q}_{Koll}}{m^2 * a} \approx \frac{\dot{Q}_{sol} * \eta_{Str.Koll.} * \eta_{Str.Korr.}}{m^2 * a} + \frac{g_{AU}}{a} * x_{Temp.} \quad (7)$$

Da diese Näherungsformel empirisch erstellt wurde, werden bei Betrachtung einzelner Betriebsmomente große Abweichungen zum tatsächlichen Ertrag auftreten. Erst bei der Betrachtung größerer Zeiträume und den Mittelwerten der einzelnen Messungen wird der Zusammenhang sichtbar.

Die Jahresdurchschnittstemperaturen und solare Jahreseinstrahlung für den jeweiligen Kollektorstandort (oder zumindest die der nächsten Wetterstation) sind bekannte Größen. Damit kann man im nächsten Schritt den maximal erzielbaren Kollektorertrag bei permanentem WP-Betrieb entsprechend aufs Jahr (8760h) übertragen:

$$\frac{Q_{J-Koll}}{m^2 * a} \approx \frac{Q_{J-sol} * \eta_{Str.Koll.} * \eta_{Str.Korr.}}{m^2 * a} + \frac{x_{Temp.} * g_{AU} * 8760h}{a} \quad (8)$$

Wärmepumpensysteme werden durch Berechnung der Heizlast für die entsprechende Aggregatleistung ausgelegt. Diese muss dann über eine entsprechende Anzahl Betriebsstunden den Jahresenergiebedarf des Gebäudes aufbringen. Empfohlen wird dabei eine WP-Betriebsdauer $t_{WP-Betr.}$ von maximal 2500h/a um eine ausreichende Eigenregeneration der Erdsonde zu ermöglichen. Bei Wärmepumpensystemen mit Metalldachkollektoren erhöht sich die Anzahl der Kollektorbetriebsstunden durch exklusive Erdsondenbeladung. Bei ausreichendem kollektorseitigen Energieangebot und fehlender WP-Wärmeforderung kann dann die Regeneration der Erdsonde erfolgen. Zur Vereinfachung wird angenommen:

$$Q_{J\text{-spez.Koll}} = \frac{Q_{J\text{-Koll}}}{m^2 * a} \text{ und } Q_{J\text{-spez.sol}} = \frac{Q_{J\text{-sol}}}{m^2 * a}$$

$$Q_{J\text{-spez.Koll}} \approx \frac{t_{WP\text{-Betr.}} + t_{ES\text{-Bel.}}}{a} * \left[Q_{J\text{-spez.sol}} * \eta_{Str.Koll.} * \eta_{Str.Korr.} + \frac{x_{Temp.} * g_{AU} * 8760h}{a} \right] \quad (9)$$

Das ISFH geht in seinen Simulationsrechnungen zum Projekt UMSYS von zusätzlich

$$\frac{t_{ES\text{-Bel.exkl.}}}{a} = 0,5 * \frac{t_{WP\text{-Betr.}}}{a} \quad (10)$$

aus [17]. Diese zeitliche Beschränkung lässt sich in Formel einsetzen und ergibt:

$$Q_{J\text{-spez.Koll}} \approx \frac{1,5 * t_{WP\text{-Betr.}}}{a} * \left[Q_{J\text{-spez.sol}} * \eta_{Str.Koll.} * \eta_{Str.Korr.} + \frac{x_{Temp.} * g_{AU} * 8760h}{a} \right]$$

Übersichtlicher und normiert dargestellt ergibt sich:

$$Q_{J\text{-spez.Koll}} \approx \frac{t_{WP\text{-Betr.}}}{a} * \left[0,171 * Q_{J\text{-spez.sol}} * \eta_{Str.Koll.} * \eta_{Str.korr.} + 1,5 * x_{Temp.} * g_{AU} \right] \quad (11)$$

wobei dann $Q_{J\text{-spez.Koll}}$ in $\left[\frac{kWh}{m^2 * a} \right]$ und $Q_{J\text{-spez.sol}}$ in $\left[\frac{kWh}{m^2 * a} \right]$ sowie $t_{WP\text{-Betr.}}$ in $[h]$

Als Nächstes wurde durch genaue Untersuchung und Selektion der aufgezeichneten Daten die Werte für $x_{Temp.}$ und $\eta_{Str.Koll.}$ ermittelt werden.

Um zwischen Q_{Str} und $\dot{Q}_{\text{Überg}}$ differenzieren zu können, wurde eine getrennte Betrachtung von vergleichbaren WP-Schaltzyklen nachts und am Tage angestellt.

5.1.2 Kollektorertrag nachts

Durch Betrachtung der nächtlichen Entzugsleistung ist es möglich, unter Ausschluss des Strahlungsanteils, empirische Aussagen allein zum konvektiven und kondensativen Wärmestromanteil zu treffen.

Aufgrund des umfangreichen Datenmaterials war es nicht möglich sämtliche Messwerte in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Berücksichtigt wurden nur bereinigte Messwerte bei Verdichterbetrieb. Zur Diversifikation wurden unterschiedliche Stichproben einzelner WP-Schaltzyklen über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet.

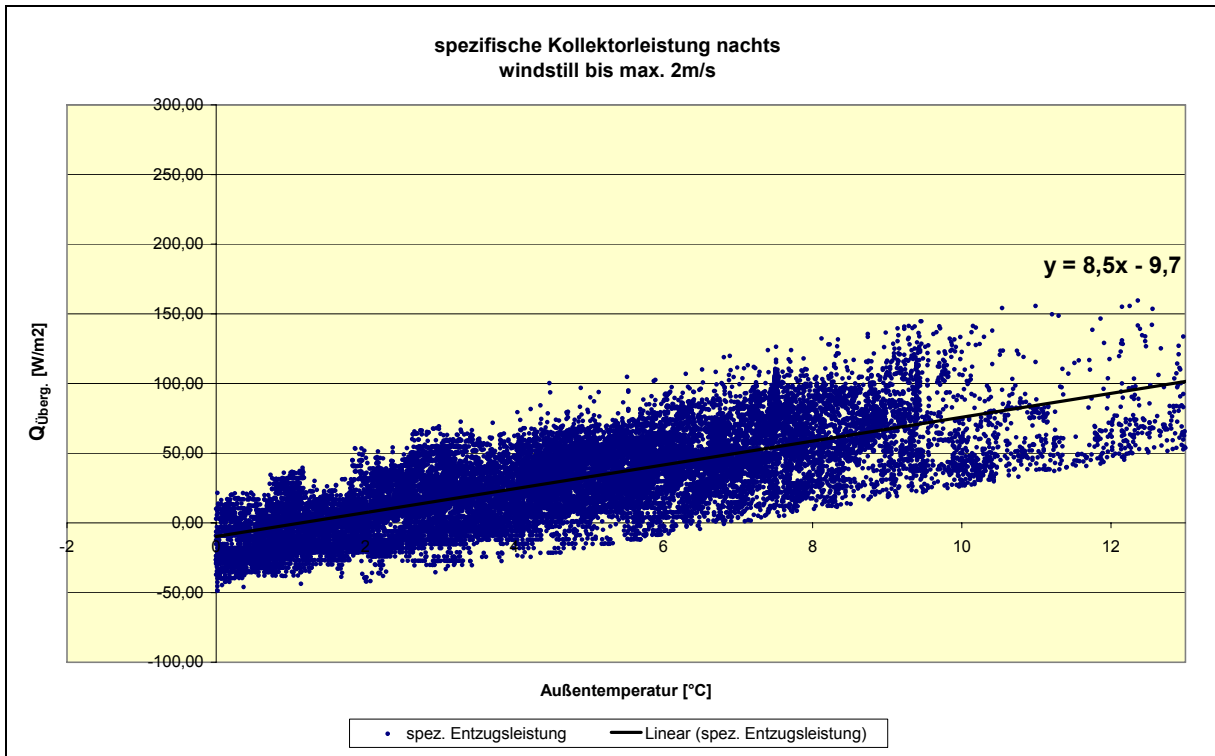


Diagramm 5 spez. Entzugsleistung nachts, windstill bis max. 2m/S

Dazu wurde zuerst der Wärmeübergangskoeffizient $x_{Temp.}$ bei geringen Windgeschwindigkeiten bis 2m/s ermittelt. Erwartungsgemäß zeichnet sich ein Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Entzugsleistung ab. (Diagramm 5).

Durch lineare Regression wurde anschließend eine Gerade der Funktion $y=8,5*x-9,7$ ermittelt. Die $9,7 \text{ W/m}^2$ sind vernachlässigbar mit der Begründung, dass bei Annäherung an den Gefrierpunkt der Kollektor wirtschaftlich gesehen an seine Grenzen kommt und die Gerade mit der Steigung 8,5 in der Nähe des Ursprungs verläuft.

Bezogen auf die gesamte Aperturfläche ergibt sich also ein Wärmeübergangskoeffizient von

$$x_{Temp.} \approx 8,5 \frac{W}{m^2 * K}$$

Daraus lässt sich der spezifische Wärmestrom ermitteln nach

$$\frac{\dot{Q}_{Überg.}}{m^2} = x_{Temp.} * \Delta T_{AU \rightarrow Koll-RL}$$

wobei nach (14) für die Temperaturdifferenz ϑ_{AU} angesetzt werden kann.

Als nächstes wurde eine weitere Selektion der Daten bezüglich der Wettereinflüsse durchgeführt.

Mit ansteigender Windgeschwindigkeit sollte sich der konvektive Ertrag des Kollektors erhöhen, da eine Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten von der Außenluft zur Kollektoroberfläche zu erwarten ist.

Diagramm 6 zeigt eine deutliche Steigerung des $x_{Temp.}$ auf $10 \frac{W}{m^2 * K}$ bei

Windgeschwindigkeiten von 2 – 20m/s.

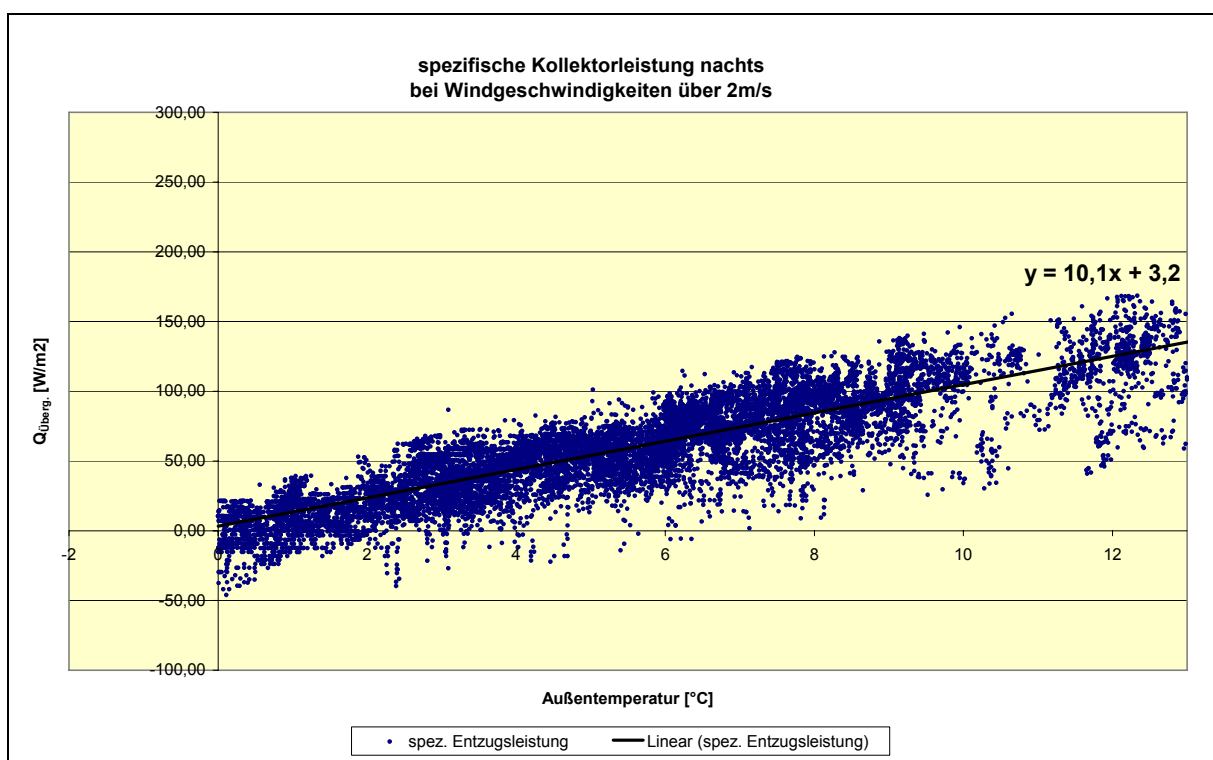


Diagramm 6 spez. Kollektorleistung nachts, Windgeschwindigkeiten über 2m/S

Die verbleibende geringe Streuung der Daten ist in erster Linie durch unterschiedliche Feuchtigkeitsbedingungen bedingt, welche nachfolgend genauer untersucht worden.

Die Ausnutzung der Phasenübergangsenthalpie des Wassers wurde bereits am ISFH im Rahmen einer Bachelorarbeit unter Laborbedingungen erforscht, allerdings ohne Niederschläge und Nebelwetterlagen zu berücksichtigen.

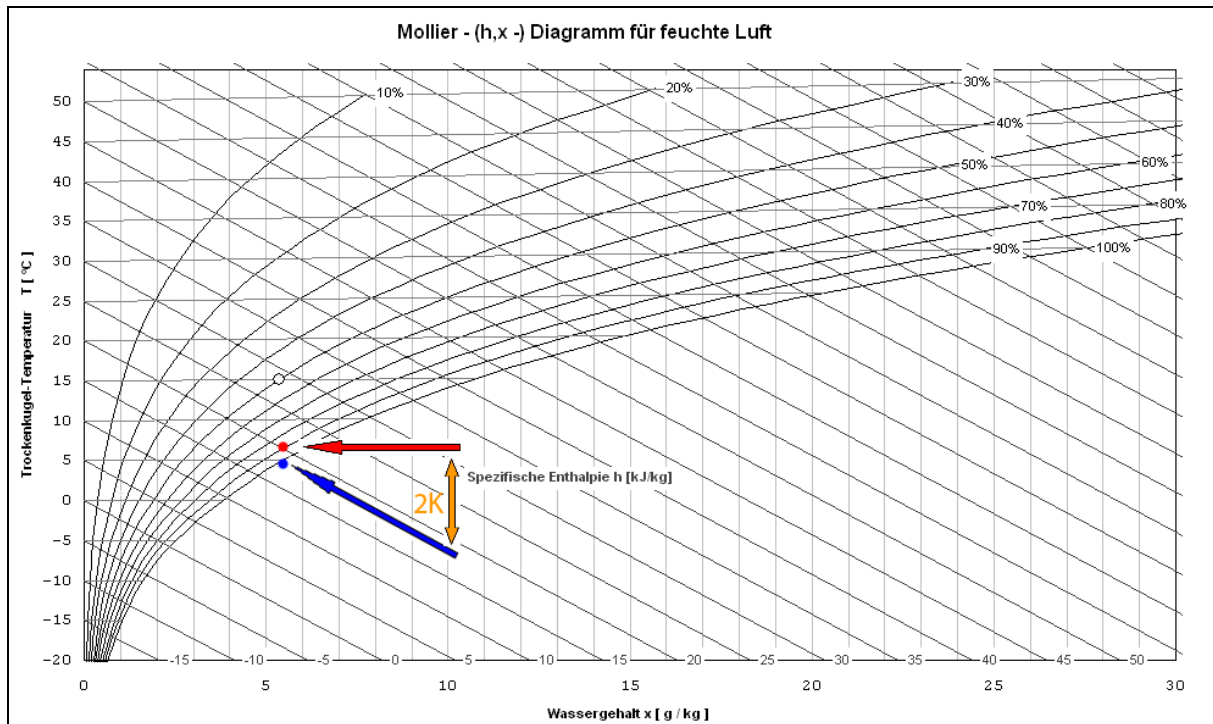


Diagramm 7 Mollier h,x-Diagramm [14]

Am Versuchsstand wurden diese Umweltbedingungen unter Praxisbedingungen in die Untersuchungen einbezogen. Dazu wurden die nächtlichen Kollektorerträge bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit (über 90%), bei geringen Windgeschwindigkeiten betrachtet. Aus dem Mollier h,x-Diagramm 7 wird ersichtlich, dass dann bereits geringe Temperaturabsenkungen von etwa 2K (Außenluft zur Zinkoberfläche) ausreichen, um ins Nebelgebiet zu gelangen. Dies führt zur Kondensationsbildung an der Kollektoroberfläche, was den Kollektorertrag steigern kann, wenn der Abtransport der Feuchtigkeit nicht über Verdunstung auf der Kollektoroberfläche erfolgt.

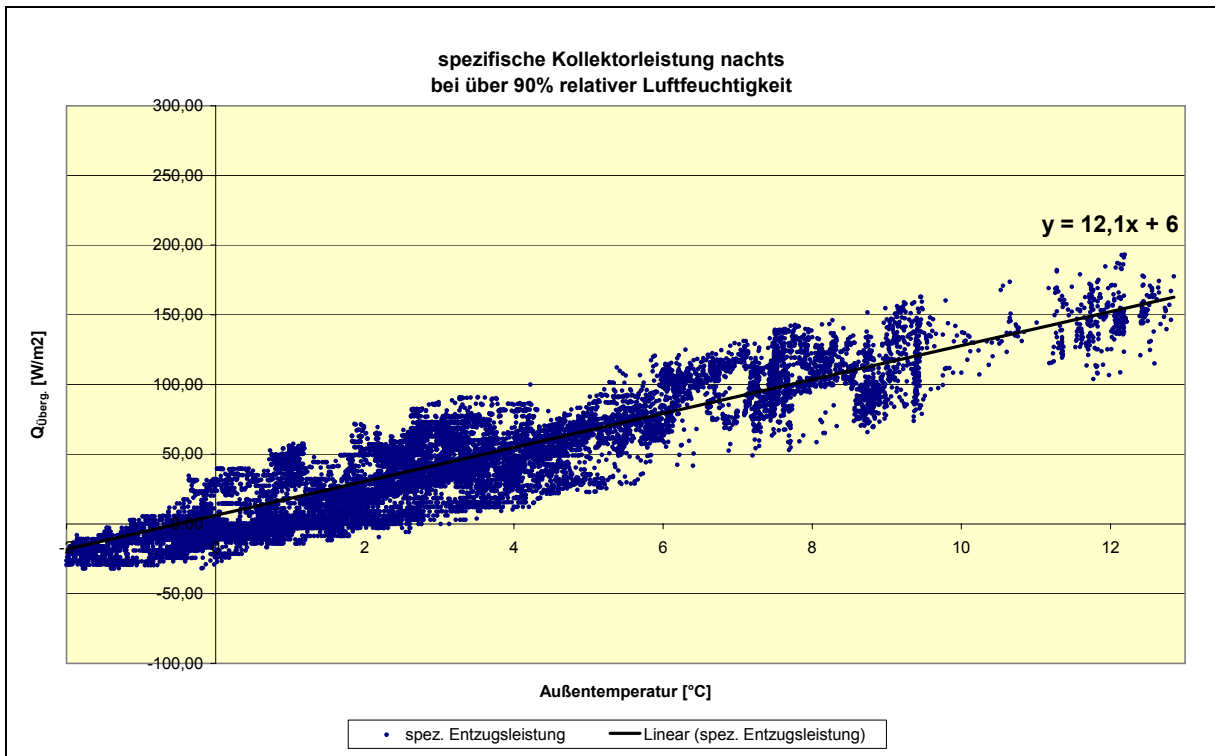


Diagramm 8 spez. Kollektorleistung nachts bei über 90% Luftfeuchtigkeit

Gegenüber dem Ertrag bei hohen Windgeschwindigkeiten zeichnete sich eine nochmalige Steigerung der nächtlichen Kollektorleistung durch Feuchtigkeit ab. Nach Diagramm 8 ergibt sich eine Wärmeübergangskoeffizient von $12 \frac{W}{m^2 * K}$

überwiegende Wetterbedingung	$x_{Temp.} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$
normal Wind, normale Luftfeuchtigkeit	8,5
Kollektor in verstärktem Maße Wind ausgesetzt	10
hohe Luftfeuchtigkeit, Niederschläge, Nebel	12

Tabelle 2 empirisch ermittelte $x_{Temp.}$ -Werte

5.1.3 Kollektorertrag am Tag

Um den Ertrag durch Strahlungsenergie ermitteln zu können, mussten Messwerte an möglichst wolkenarmen Tagen, bei kontinuierlich laufender WP herangezogen werden. Da gerade am Tage bei höherer solarer Einstrahlung die witterungsgeführte Heizungsregelung auf geringeren Bedarf umschaltet, konnten nur Daten von wenigen Tagen genutzt werden. Stillstandszeiten des WP-Systems wurden herausgefiltert, ebenso dürfen die ersten Messwerte nach dem Einschaltvorgang nicht berücksichtigt werden. Hier kommt es zu erheblich abweichenden Messwerten, da die im Kollektor und Fluid gespeicherten Energien mit erfasst werden, siehe Diagramm 9.

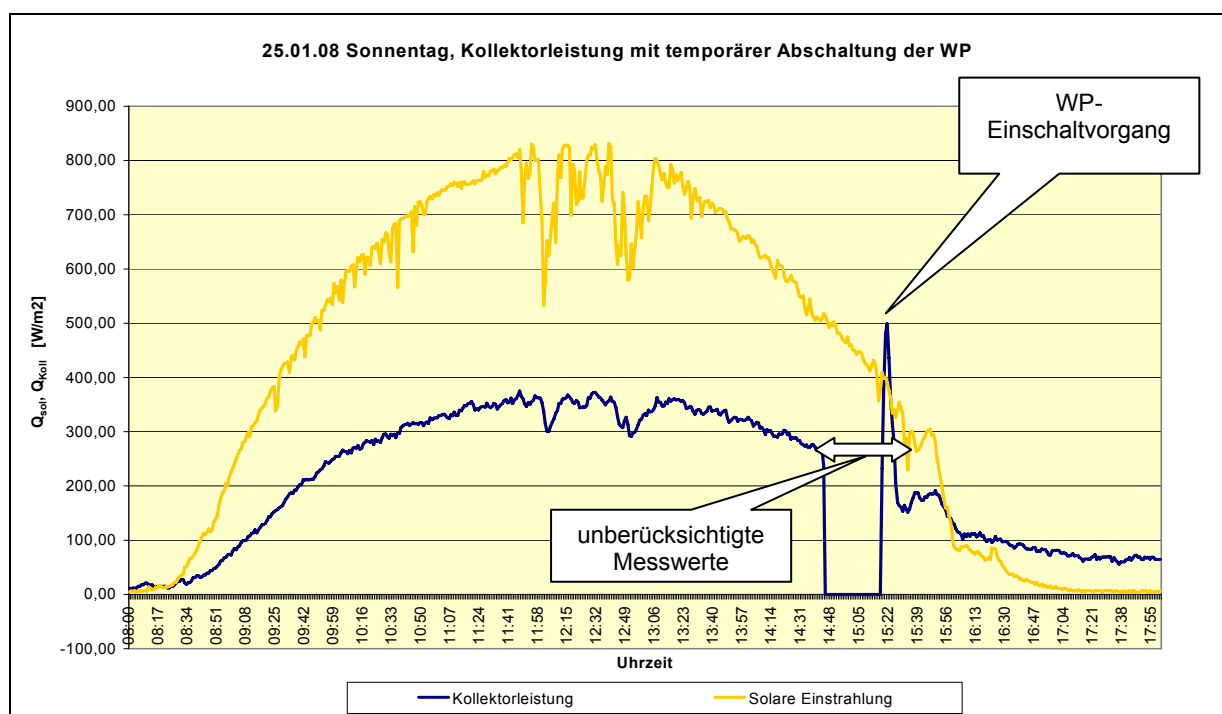


Diagramm 9 Abschaltung der WP bei Erreichung des Pufferspeichersollwerts

Die einfache Betrachtung des Gesamtertrags tagsüber, während bereinigter WP-Zyklen beinhaltet neben dem Strahlungsenergiegewinn auch Beiträge durch Konvektion und teilweise auch Kondensation. Daher ist mit einer hohen Varianz der Messwerte zu rechnen. Dies bestätigte sich dann auch während der Auswertung. Diagramm 10 zeigt die erzielte Kollektorleistung $\dot{Q}_{Koll} = \dot{Q}_{str.} + \dot{Q}_{Überg.}$, sortiert nach der solaren Einstrahlung auf die Kollektorebene.

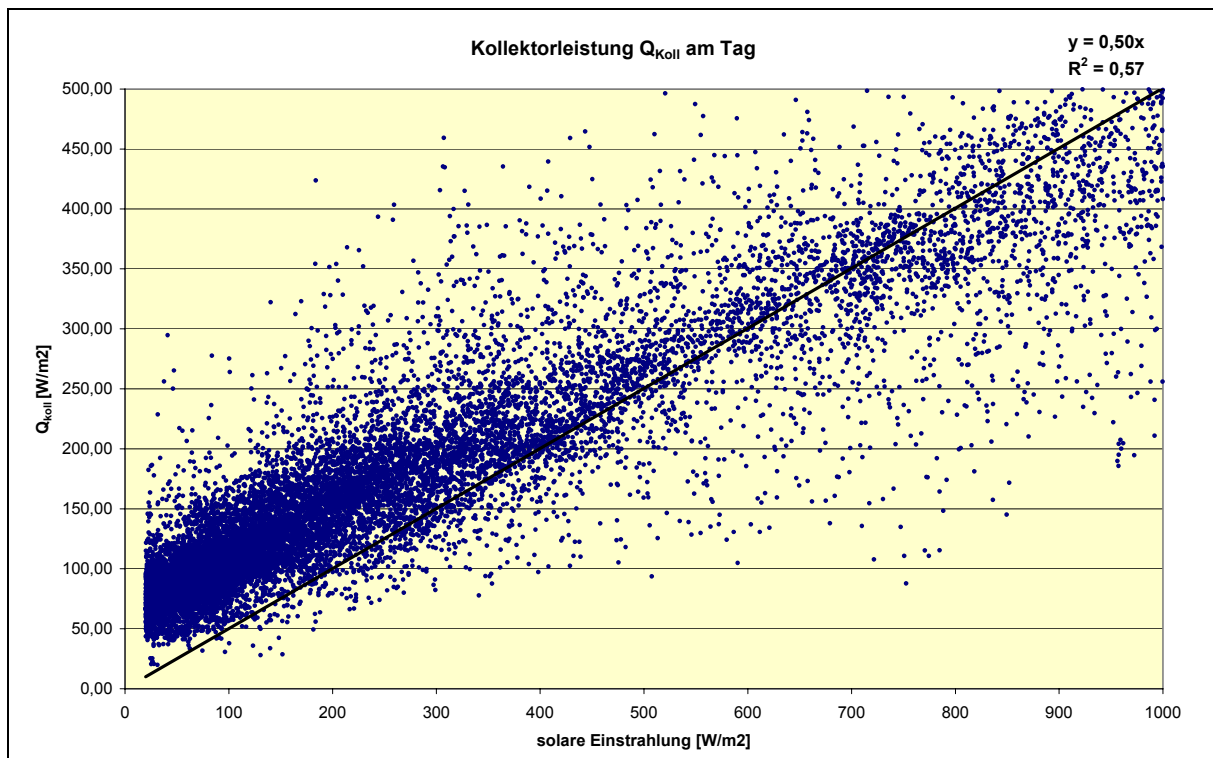


Diagramm 10 Kollektorleistung am Tage

Anzumerken ist, dass hierbei nur Daten ab 2°C Außentemperatur berücksichtigt wurden, da es bei tieferen Temperaturen zu starken Schwankungen der Ertragswerte kam.

Im nächsten Schritt wurden aus der Entzugsleistung der temperaturabhängige Anteil $Q_{Überg.}$ nach der ermittelten Linearisierungskennlinie heraus gerechnet, (Formel 5). Als Ergebnis entstand Diagramm 11, welches als eine Aussage über den Wirkungsgrad des Kollektors bezogen nur auf die solare Einstrahlung zulässt.

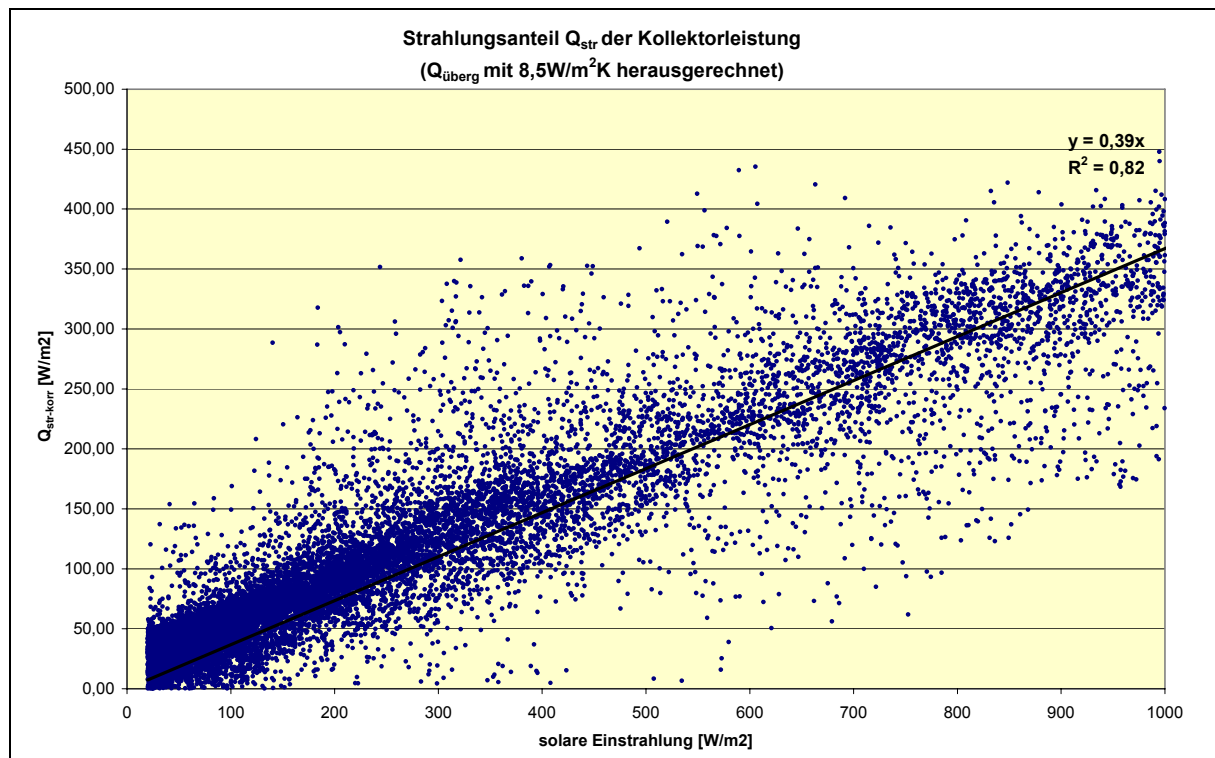


Diagramm 11 Kollektorleistung mit heraus gerechnetem Temperaturanteil

Die Regressionsgerade weist eine Steigung von $0,39x$ auf, die Datenpunkte sind haben sich

durch den Abzug von $8,5 \frac{W}{m^2 * K}$ visuell deutlich angenähert. Das Bestimmtheitsmaß als

Wert für die Qualität der linearen Approximation bestätigt dies mit einer Steigerung von 0,57 auf 0,82.

Fazit:

Mit dieser Methode kann eine grobe Abschätzung des möglichen jährlichen Kollektorertrags vorgenommen werden, wenn regionale Jahresdurchschnittstemperaturen und solare Einstrahlung bekannt sind.

Dieser vereinfachte Einstrahlungswirkungsgrad von 0,39 orientiert sich an dem Kollektorfeld des FBZ - Versuchsstandes mit 45° Anstellwinkel sowie 30° Azimutwinkel und kann nicht mit dem Konversionsfaktor gleichgesetzt werden. Bei abweichender Ausrichtung muss mit geringfügiger Änderung dieses Wertes gerechnet werden.

Dazu bietet sich Diagramm 12 an, welches vom ISFH zur Ermittlung des Kollektorflächenkorrekturfaktors erstellt wurde.

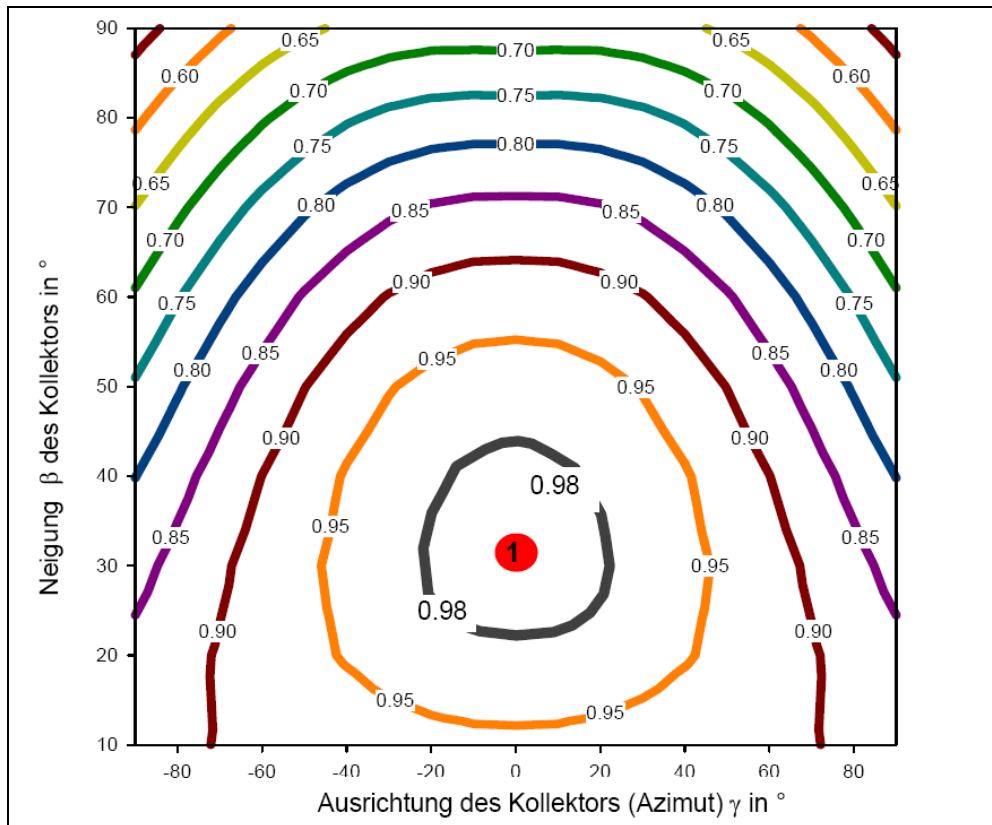


Diagramm 12 Korrekturfaktor zur Kollektorausrichtung [17] (Quelle ISFH)

Danach muss der Korrekturfaktor von 0,95 für den am Versuchsstand ermittelten

Einstrahlungswirkungsgrad zur optimalen Ausrichtung erfolgen, $\eta_{Str.Koll} = \frac{0,39}{0,95} = \underline{\underline{0,41}}$

5.1.4 Ermittlung der Mindesttemperaturdifferenz zur zuverlässigen Regelung

Das Konzept der Fa. RHEINZINK® „SolarGeoThermie 2Q“ [18] sieht vor, die drei möglichen Betriebszustände der Systemvariante nach Abbildung 2

- Erdsondenentladung
- exklusive Erdsondenregeneration
- Direktbetrieb Kollektor und Erdsonde

mit geringen Investitionskosten ökonomisch und zuverlässig anzuregeln.

Dafür sollte möglichst wenig Sensorik eingesetzt werden. Man beschränkt sich auf die 3 nachfolgend angegebene PT1000 Anlegetemperaturfühler:

- $T_{WP-prim-VL}$
- T_{ES-VL}
- $T_{Koll-VL}$ (zwischen Zinkblech und Kollektor-Ausgang platziert)

Zusätzlich muss bei jeder Heizungsanlage ein Außentempersensor zur witterungsgeführten Ansteuerung der WP zur Verfügung stehen, $T_{Koll-VL}$ kann diese Funktion nicht übernehmen.

Nach Kapitel 5.1.3 sind erst Daten ab $\vartheta_{AU} = 2^{\circ}C$ zuverlässige Entzugsleistungen auf der Kollektorfläche möglich. Dies ist aber ein anlagenspezifischer Wert und unter anderem von $T_{WP-prim-VL}$ abhängig.

Übertragen auf ein beliebiges WP-System sollte der Volumenstrom im Kollektorkreis mittels ΔT -Regelung angesprochen werden. Da der Sensor $T_{Koll-VL}$ aber nicht direkt die Fluidtemperatur misst, sondern einen Wert zwischen Rohrtemperatur und Zinkoberfläche muss eine Vergrößerung der Einschalttemperaturdifferenz erfolgen. Sonst ist bei ungünstigen Witterungsverhältnissen mit negativen Kollektorleistungen zu rechnen.

Da $T_{WP-prim-VL}$ während der Messzyklen geringfügigen Schwankungen unterworfen war, wurden Daten aller aufgetretenen Witterungen diesbezüglich selektiert und die übertragbare Wärmeleistung je K Temperaturdifferenz aufgetragen nach Diagramm 13.

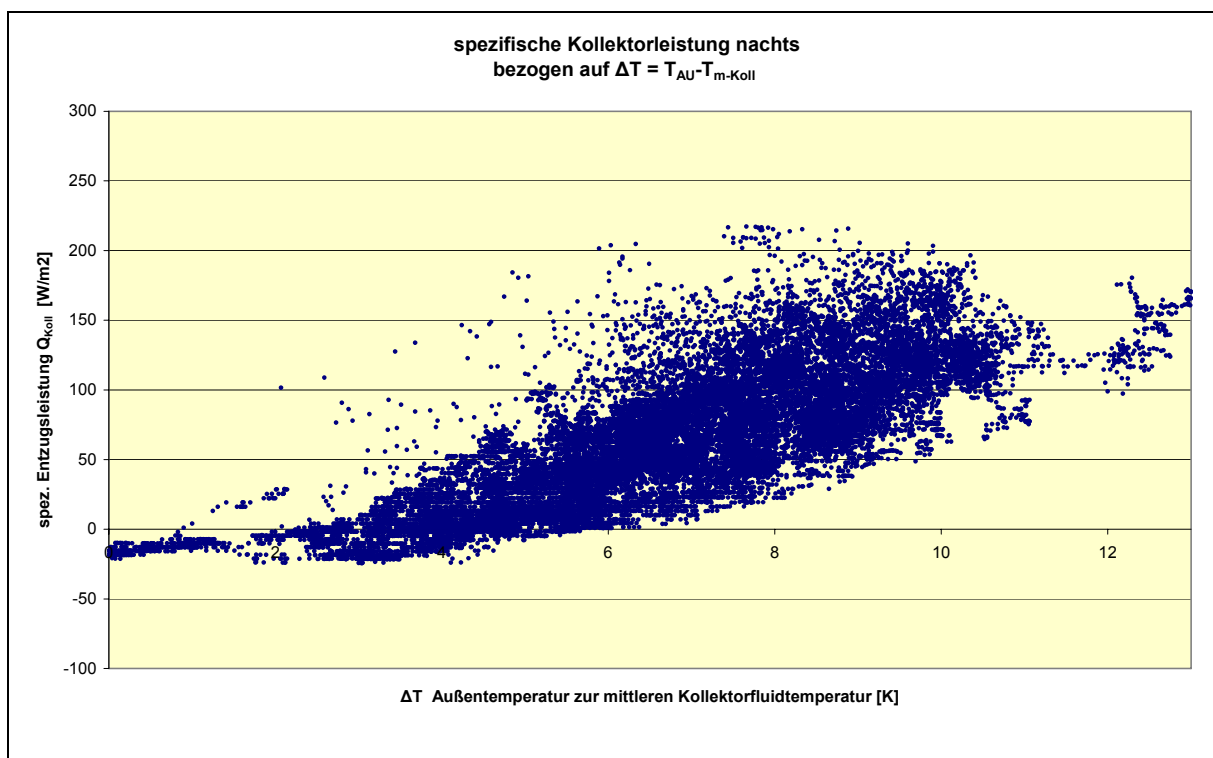


Diagramm 13 spezifische Entzugsleistung nachts $\Delta T_{AU-Koll}$ bezogen

Aus dem Diagramm ergibt sich, dass eine Temperaturdifferenz von 6K notwendig ist um dem Kollektor auch unter schwankenden Wetterbedingungen (Wind, Feuchtigkeit) zuverlässig Wärmeenergie entziehen zu können.

Es wird daher empfohlen unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von Kapitel 5.3.1, die Einschaltbedingung für die Solarkreispumpe und die Umschaltung des Dreiwegeventils auf Kollektorkreislauf den Bedingungen nach Abbildung 4 abhängig zu machen:

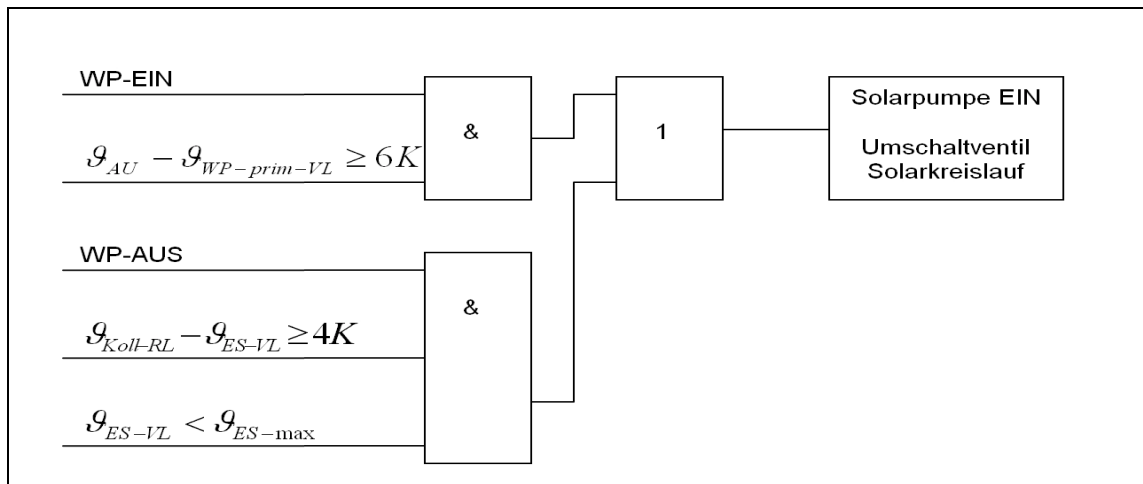


Abbildung 4 Einschaltbedingungen Solarkreis

5.2 Überprüfung der Theorie

Um die Annahmen bezüglich des Energiegewinns am Kollektor zu überprüfen wurden die tatsächlich gemessenen Werte am Kollektor mit den nur auf Grundlage von Temperatur und Einstrahlung berechneten Erträgen verglichen. Aufgrund der bisherigen selektiven Untersuchungen können dazu drei Wetterbedingungen unterschieden werden, siehe dazu Tabelle 2.

Zuerst wurden dazu die Kollektorleistungen am Tage betrachtet, bei unterschiedlichen Außentemperaturen. Damit wurde festgestellt, in wieweit der empirische Strahlungswirkungsgrad $\eta_{str.Koll} = 0,41$ und der empirische Wärmeübergangskoeffizient

von $x_{Temp} = 8,5 \frac{W}{m^2 * K}$ anwendbar ist.

Diagramm 14 zeigt dazu das typische reale Verhalten der Kollektorleistung an einem sonnigen Tag, sowie die mittels Tabellenkalkulation aus den Wetterdaten berechnete

jeweilige momentane Kollektorleistung. Die wetterabhängig berechnete und die tatsächliche Kollektorleistung liegen eng beieinander.

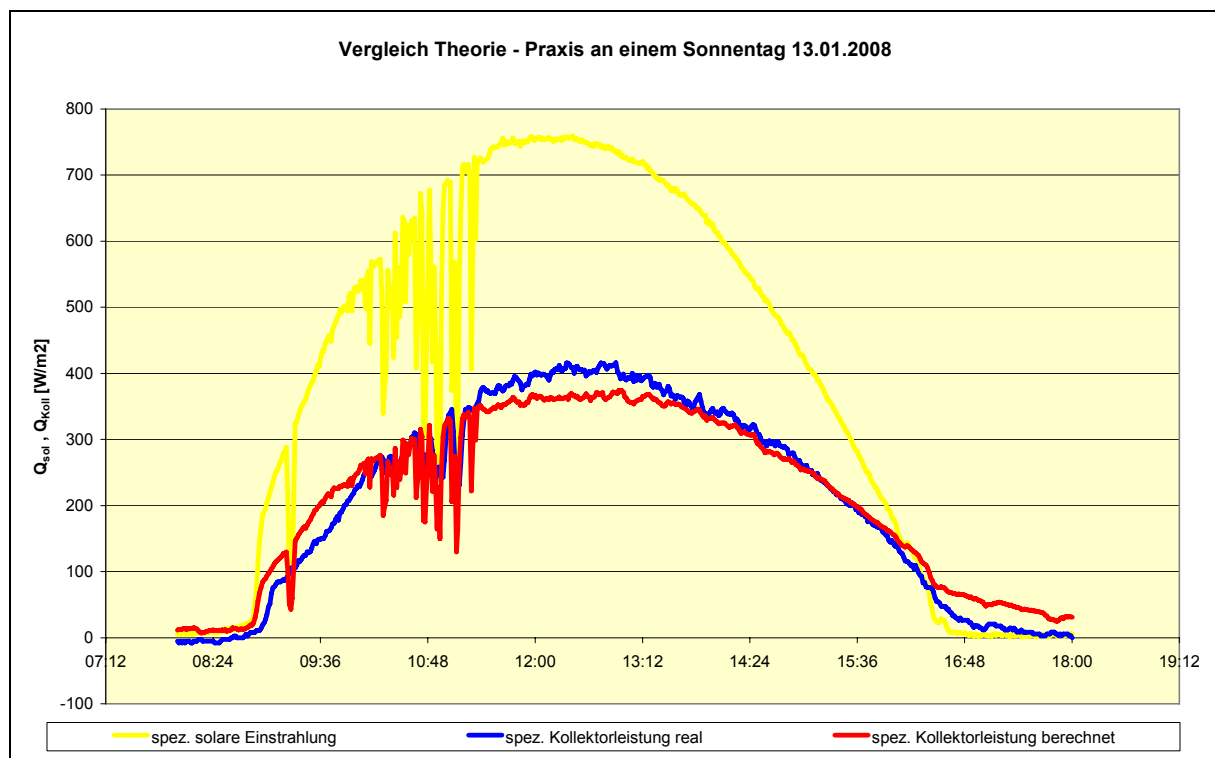


Diagramm 14 Vergleich Theorie – Praxis an einem Sonnentag

Die leichte Überhöhung des theoretischen Ertrags in den Abendstunden ist rein zufällig. Diverse Sonnentage wurden über den Versuchszeitraum noch auf diese Weise kontrolliert, die Ergebnisse gestalten sich aber durchweg sehr ähnlich. Geringe Differenzen zur tatsächlichen Kollektorleistung traten vor allem nachts auf, insbesondere durch den Einfluss von starken Wind und/ oder erhöhter Luftfeuchtigkeit.

Als Nächstes erfolgte die Überprüfung bei stark wechselnden Witterungsbedingungen. Es sollte getestet werden, ob dann mit den vereinfachten Mitteln noch eine zuverlässige Ertragsprognose möglich ist.

Dazu wurden eine Reihe verschiedener Wetterphasen betrachtet, Diagramm 15 zeigt einen solchen Zeitraum über 5 Tage. Zu erkennen sind die einzelnen WP-Schaltzyklen und die gute Deckung der theoretischen und tatsächlich erzielten Kollektorleistung.

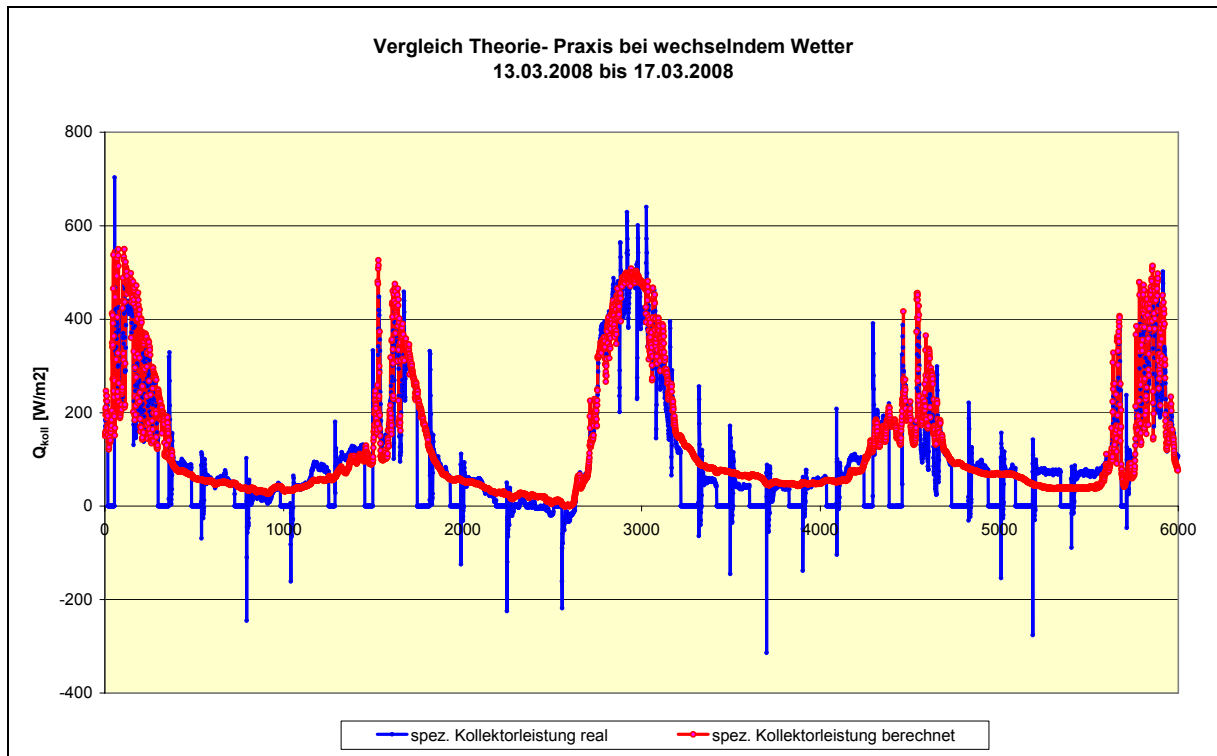


Diagramm 15 Vergleich bei wechselndem Wetter

Im nächsten Schritt wurden die Näherungsformeln auf den Jahresertrag der Versuchsanlage angewandt, um die Theorie weiter zu überprüfen.

Jahresertragsabschätzung für den Versuchsstandort:

Am Standort ist nach Abbildung 8 eine Jahreseinstrahlung von $Q_{J-spez.sol} = 1050 \frac{kWh}{m^2 * a}$ auf die horizontale Ebene zu erwarten.

Nach Diagramm 12 ergibt sich für das Kollektorfeld des Versuchsdaches mit 45°

Anstellwinkel und -30° Azimutwinkel ein Korrekturfaktor $\eta_{Str.korr} = 0,95$ zum

Strahlungswirkungsgrad $\eta_{Str.Koll.} = 0,39$

Die langjährige durchschnittliche Jahresaußentemperatur beträgt am Versuchsstandort $9,4^\circ C$ [16].

Für die Versuchsanlage ergibt sich also nach **(11)** bei einer angenommenen Betriebszeit nach VDI 4640 von 1800h und 900h exklusive Erdsondenregeneration ein abgeschätzter Jahresertrag von:

$$Q_{J\text{-spez.Koll}} = \frac{1800h}{a} * \left[0,171 * 1050 \frac{kWh}{m^2 * a} * 0,41 * 0,95 + 1,5 * 8,5 \frac{W}{m^2 * K} * 9,4K \right]$$

$$Q_{J\text{-spez.Koll}} = 126 \frac{kWh}{m^2 * a} + 216 \frac{kWh}{m^2 * a} = \underline{\underline{342 \frac{kWh}{m^2 * a}}}$$

Der empirische Strahlungsertrag $Q_{J\text{-str.}}$ beträgt $126 \frac{kWh}{m^2 * a}$, und der temperaturabhängige

Anteil $Q_{J\text{-Überg}}$ demnach $216 \frac{kWh}{m^2 * a}$ Aperturfläche.

Jahresertragsberechnung für den Versuchsstandort:

Die am Versuchsstand eingesetzte Wärmepumpeneinheit war leistungsmäßig für die Heizlast (13,91kW nach [37]) unterdimensioniert. Um den Wärmebedarf annähernd zu decken musste die benötigte Energie über eine längere Einschaltzeit zur Verfügung gestellt werden. Daher erfolgten überdurchschnittliche 3232 Verdichterbetriebsstunden und wegen der vollständigen Erdsondenregenerierung nur 1021 Stunden exklusive Erdsondenbeladung, siehe Tabelle 10.

Daher kann nicht die gekürzte Formel **(11)** mit $t_{Koll\text{-Betr.}} = 0,5 * t_{WP\text{-Betr.}}$ angewandt werden, sondern ausführlich nach **(9)**:

$$Q_{J\text{-spez.Koll}} \approx \frac{3232h + 1021}{a} * \left[1050 \frac{kWh}{m^2 * a} * 0,41 * 0,95 + \frac{8,5 \frac{W}{m^2 * K} * 11,25K * 8760h}{a} \right]$$

$$Q_{J\text{-spez.Koll}} \approx 199 \frac{kWh}{m^2 * a} + 407 \frac{kWh}{m^2 * a} = \underline{\underline{606 \frac{kWh}{m^2 * a}}}$$

Dieser Wert von $606 \frac{kWh}{m^2 * a}$ entspricht in guter Näherung dem tatsächlich erzielten

Kollektorsertrag. Der direkt am Kollektor gemessene Ertrag betrug für den Versuchszeitraum

$625 \frac{kWh}{m^2 * a}$ (Addition der Ertragsdaten Tabelle 12 bis Tabelle 21). Die Abweichung des mit

der Näherungsformel ermittelten Kollektorertrags beträgt akzeptable

$$\frac{606 \frac{kWh}{m^2 * a} - 625 \frac{kWh}{m^2 * a}}{625 \frac{kWh}{m^2 * a}} = -3\%$$

Jahresertragsberechnung, allgemeine Abschätzung für das Kollektorsystem

Wärmepumpen laufen diskontinuierlich 1500h bis 2500 h im Jahr. Mit den in Deutschland herrschenden Wetterbedingungen lässt sich daraus der minimale Jahresertrag abschätzen:

minimaler Ertrag $Q_{J-spez.Koll-min} \left[\frac{kWh}{m^2 * a} \right]$			
$Q_{J-spezsol}$	$\eta_{Str.korr.}$	t_{Koll}	g_{AU}
$900 \frac{kWh}{m^2 * K}$	0,7	1000h	5°C
$Q_{J-spez.Koll-min} \approx \frac{1500h}{a} * \left[0,171 * 900 \frac{kWh}{m^2 * a} * 0,41 * 0,7 + 1,5 * 8,5 \frac{W}{m^2 * K} * 5K \right] \approx 110 \frac{kWh}{m^2 * a}$			

Tabelle 3 minimaler spezifischer Kollektorjahresertrag

Und dem gegenüber steht ein Maximalertrag für 2500 Betriebsstunden nach Tabelle 4

minimaler Ertrag $Q_{J-spez.Koll-max} \left[\frac{kWh}{m^2 * a} \right]$			
$Q_{J-spezsol}$	$\eta_{Str.korr.}$	t_{Koll}	g_{AU}
$1200 \frac{kWh}{m^2 * K}$	1	2500h	12°C
$Q_{J-spez.Koll-max} \approx \frac{2500h}{a} * \left[0,171 * 1200 \frac{kWh}{m^2 * a} * 0,41 * 1 + 1,5 * 8,5 \frac{W}{m^2 * K} * 12K \right] \approx 600 \frac{kWh}{m^2 * a}$			

Tabelle 4 maximaler spezifischer Kollektorjahresertrag

5.2.1 Bezug zu Referenzobjekten

Ziel der einfachen empirischen Formel ist, schnell und auch vom Praktiker nachvollziehbar, für die Mehrheit der Anwendungsfälle Ertragsprognosen zu erstellen. Daher wurde im nächsten Schritt überprüft, ob sich die Berechnung ohne Variablenerweiterung auf andere Standorte, Anlagenkonfigurationen und Anlagendimensionierungen anwenden lässt.

Objekt Einfamilienhaus Dresden [19]

Leider standen nur 2 Jahre Ertragsdaten eines einzigen Referenzobjekts (EFH Dresden, Bauherr Fam. Lucke, Christian-Sülze-Str.) zur Verfügung. Die Werte des ersten Jahres mit Anlagenbetrieb von 10.2003 bis 09.2004 waren nicht verwendbar, da die Isolierung im Obergeschoss noch fehlte und die Bautrocknung des Gebäudes mit der WP erfolgte (entgegen allg. Empfehlungen). Daher konnte nur ein Vergleich mit den Daten von 10.2004 bis 09.2005 durchgeführt werden.

Objektdaten:

- horizontale Erdwärmequelle, 320m² Kollektorfläche, 1m tiefe Verlegung im lehmigen Boden
- Sole/Wasser-WP, 13,8 kW Leistung
- Kollektorfläche: 40m² QUICK STEP® - Solarthermie "vorbewittert, blaugrau"
- Dachneigung 15°, südwestliche Ausrichtung

Messdaten 10.2004 bis 09.2005:

- Verbrauch Heizung: 20879 kWh
- Verbrauch Warmwasser: 2988 kWh
- Direkter Kollektorsertrag 3514 kWh
- Regenerierungsertrag 3942 kWh

Der Wärmegewinn des Kollektorkreises betrug also insgesamt 7456 kWh, das ergibt einen

spezifischen Kollektorsertrag:
$$Q_{J-spez.Koll} = \frac{7456kWh}{40m^2 * a} = \underline{\underline{186,4 \frac{kWh}{m^2 * a}}}$$

Anwendung der empirischen Formel

Für die Anwendung der vereinfachten Formel wird eine Aussage über die WP-Betriebsstunden benötigt. Da diesbezüglich leider keine Angaben vorlagen, wurde vom Jahreswärmeenergiebedarf und der installierten Heizleistung zurück gerechnet.

$$\frac{t_{WP-Betr.}}{a} \approx \frac{Q_{J-H}}{P_{HL}} \quad (12)$$

$$\frac{t_{WP-Betr.}}{a} \approx \frac{20879 \frac{kWh}{a} + 2988 \frac{kWh}{a}}{13,8kW} \approx 1729 \frac{h}{a}$$

Weiterhin war an dem Referenzobjekt keine Wetterdatenaufzeichnung durchgeführt worden, so dass auf Werte des DWD zurückgegriffen werden musste. Das ergab 2004 für die Wetterstation Dresden Klotzsche:

$$g_{AU} = 9,3^{\circ}C$$

Nach Abbildung 8 ergibt sich für Dresden eine Jahreseinstrahlung von:

$$Q_{J-spez.sol} = \frac{1000kWh}{m^2 * a}$$

Nach Diagramm 12 muss für die Kollektorausrichtung bei südwestlichen Azimut und 15° Anstellwinkel mit einem Korrekturfaktor gerechnet werden:

$$\eta_{Koll_Korr.} = 0,9$$

$$Q_{J-spez.Koll} \approx \frac{t_{WP-Betr.} + t_{ES-Bel.}}{a} * \left[Q_{J-spez.sol} * \eta_{Str.Koll.} * \eta_{Str.Korr.} + \frac{x_{Temp.} * g_{AU} * 8760h}{a} \right]$$

$$Q_{J-spez.Koll} \approx \frac{1729h}{a} * \left[1000 \frac{kWh}{m^2 * a} * 0,41 * 0,90 + \frac{8,5 \frac{W}{m^2 * K} * 9,3K * 8760h}{a} \right]$$

$$Q_{J-spez.Koll} \approx 72,8 \frac{kWh}{m^2 * a} + 136,7 \frac{kWh}{m^2 * a} \approx \underline{\underline{210 \frac{kWh}{m^2 * a}}}$$

Fazit:

Dem tatsächlichen spezifischen Kollektorertrag in Höhe von $186,4 \frac{kWh}{m^2 * a}$ steht ein prognostizierter Wert von $210 \frac{kWh}{m^2 * a}$ gegenüber. Das ist eine Abweichung von

$$\frac{210 \frac{kWh}{m^2 * a} - 186,4 \frac{kWh}{m^2 * a}}{186,4 \frac{kWh}{m^2 * a}} = 12\%$$

Allerdings ist bei diesem Objekt auch die Erdwärmequelle und das Kollektorfeld überdimensioniert, so dass mit einer frühzeitigen Erwärmung des Bodens auf Normalniveau zu rechnen war. Die empirische Formel geht aber von einem Ganzjahresbetrieb aus. Eine vorzeitige Regeneration innerhalb der überproportional starken Einstrahlungsmonate muss zu Abstrichen beim Kollektorertrag führen.

Ein weiterer denkbarer Grund für den Minderertrag ist die Art der Erdwärmequelle. Flachkollektoren selbst reagieren viel sensibler auf solaren Eintrag, Boden- und damit auch Fluidtemperaturen unterscheiden sich von denen einer Erdsonde.

Insgesamt betrachtet ist für den Kollektorgewinn eine Abweichung von 12% akzeptabel, bedenkt man die große Zahl unberücksichtigter Einflussfaktoren aufgrund der Vereinfachungen.

Es ist wünschenswert, mehr Objekte auf deren Ertrag zu untersuchen und mit den prognostizierten Werten zu vergleichen.

5.2.2 Vergleich mit Auslegungsempfehlungen des ISFH Hameln

Auf eine detaillierte Beschreibung der Dimensionierungsansätze wird hier verzichtet (siehe Auslegungsempfehlungen des ISFH zum Projekt UMSYS)

Wichtig war, festzustellen, in wieweit sich die Abschätzung des Kollektorertrags nach der empirischer Formel und die Annahmen des ISFH dazu annähern.

Ohne Einsatz der Metalldachkollektoren wäre also eine Erdsondelänge (mit $80kWh/(m*a)$, nach VDI Tabelle 7)

$$Q_{J-spez,ES} = \frac{1 \frac{MWh}{a}}{0,08 \frac{MWh}{m * a}} * \frac{4,6 - 1}{4,6} = 9,8 \frac{m}{MWh * a} \text{ Entzugsenergie notwendig.}$$

Der empfohlene Auslegungsbereich beginnt unter Anwendung von Diagramm 35 aber schon bei etwa bei 7m Erdsondenlänge je MWh/a.

Die Berechnungen am ISFH gehen daher je MWh Energieverbrauch von folgendem maximalen Erdsondenentzug aus:

$$80 \frac{kWh}{m * a} * 7m = 560 \frac{kWh}{a}$$

und dazu ein Elektroenergieanteil von:

$$\frac{1MWh}{4,6 * a} = 217 \frac{kWh}{a}$$

Die fehlende Wärmeenergie von der 2. WQA aufgebracht werden. Daraus folgt, dass man am ISFH den Jahreskollektorsertrag je MWh Wärmeabgabe mit mindestens

$$Q_{J-Koll-Dim} = 1 \frac{MWh}{MWh * a} - 560 \frac{kWh}{MWh * a} - 217 \frac{kWh}{MWh * a} = 223 \frac{kWh}{MWh * a}$$

ansetzt.

Die Dimensionierungsempfehlung zur Kollektorfläche im Diagramm 35 beginnen

$$\text{für } l_{ES, spez} = 7 \frac{m}{MWh} \text{ bei } A_{Koll, spez} = 0,8 \frac{m^2}{MWh} .$$

Daraus lässt sich ableiten, dass:

$$Q_{J-spez.Koll-Dim} = \frac{Q_{J-Koll-Dim}}{A_{Koll, spez}} = \frac{223 \frac{kWh}{MWh * a}}{0,8 \frac{m^2}{MWh}} = 279 \frac{kWh}{m^2 * a}$$

Im Vergleich dazu ergibt die Anwendung der empirischen Näherungsformel für 1800h WP-

Nennbetrieb (nach VDI Tabelle 7), 1000 $\frac{kWh}{m^2 * a}$ Jahreseinstrahlung und 8°C mittlere

Außentemperatur bei optimaler Kollektorausrichtung:

$$Q_{J-spez.Koll.} \approx \frac{1800h}{a} * \left[0,171 * 1000 \frac{kWh}{m^2} * 0,41 + 1,5 * 8,5 \frac{W}{m^2 * K} * 8K \right] \approx \underline{\underline{310 \frac{kWh}{m^2 * a}}}$$

Setzt man die Näherungsformel und den Ansatz des ISFH ins Verhältnis, so ergibt sich eine

$$\text{Abweichung von } \frac{310 \frac{kWh}{m^2 * a} - 279 \frac{kWh}{m^2 * a}}{279 \frac{kWh}{m^2 * a}} = 11\% .$$

Fazit:

Der 11% niedrigere Ansatz in den UMSYS-Auslegungsempfehlungen kann mit möglichen Sicherheitszuschlägen bei den Witterungsbedingungen erklärt werden (entsprechen in der Näherungsformel etwa einer 1,3K niedrigeren mittleren Außentemperatur). Für diese Annahme spricht auch, dass die Korrekturfaktoren für unterschiedliche Wetterregionen nach den ISFH-Empfehlungen nur von 0,95 bis 1,11 reichen (<700m über NN) [17].

Die Näherungsformel dagegen dient der Ertragsabschätzung ohne Berücksichtigung von EVU-Schaltzeiten sowie Sicherheitszuschlägen und wird deshalb (in der Regel) höhere Kollektorgewinne prognostizieren als Dimensionierungs-Empfehlungen. Aus diesem Grund kann von einer Festigung der Ertragsannahmen durch den Vergleich mit den UMSYS-Auslegungsempfehlungen des ISFH ausgegangen werden.

5.3 Verhalten der Erdwärmequelle

5.3.1 Regeneration der Erdsonde

Während der Stillstandszeiten des WP-Systems wird die Kollektorenergie bei ausreichender Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Erdsonde zur Regenerierung des Erdreichs eingesetzt.

Innerhalb des Versuchszeitraums zeichnete sich im Mai 2008 erstmalig ein auf Monatszeit negativem Erdsondenentzug ab.

Bei den Versuchen zur Simulation eines EFH zeigte sich, dass ein

$\Delta T_{Koll(VL)-ES(RL)} \geq 4K$ erforderlich war um (unter Ausschluss der erforderlichen

Pumpenenergie) einen zuverlässigen Regenerationsbetrieb der Erdsonde zu gewährleisten.

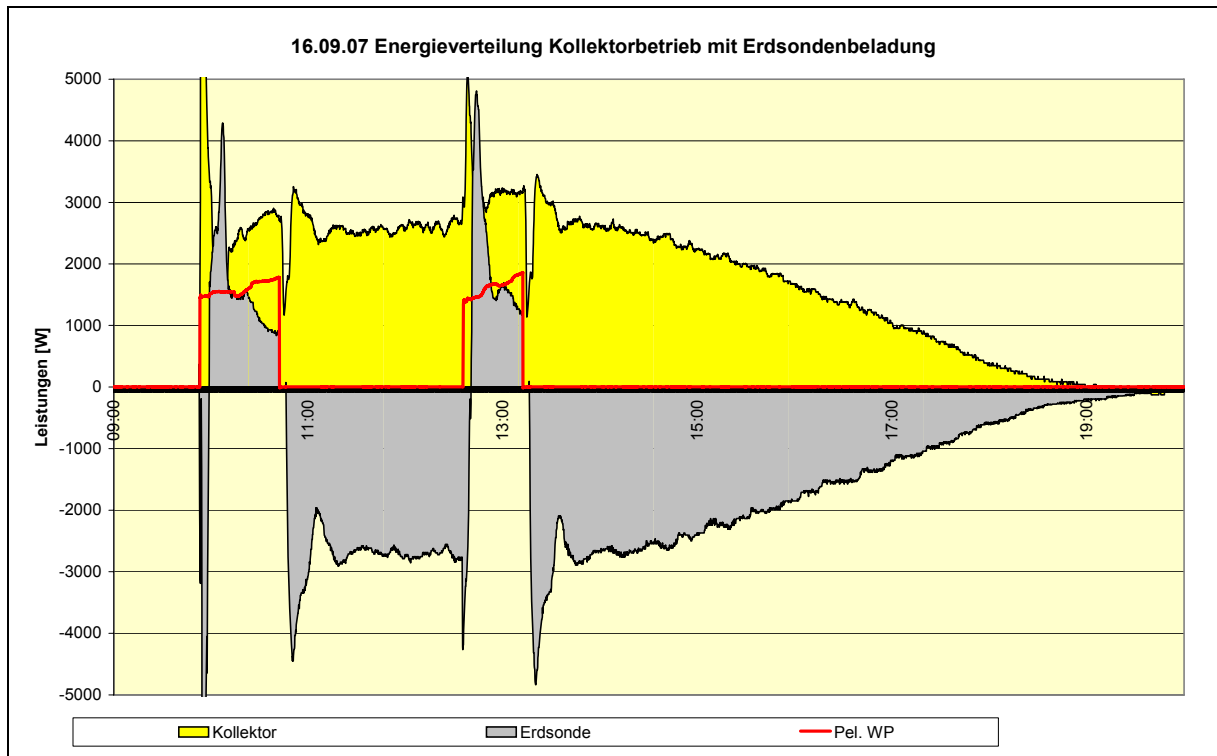


Diagramm 16 Erdsondenbelastung unterbrochen von WP-Zyklen

Diagramm 16 zeigt einen Tag mit vorwiegender Erdsondenbelastung, unterbrochen von zwei WP-Schaltzyklen. Die Flächen stellen den übertragenen Wärmestrom dar. Die genaue Betrachtung dieses Tages zeigte bei einem Kollektorertrag von 13,65 kWh eine Energieübertragung auf die Erdsonde von 14,64 kWh. Der Kollektor selbst trug also nur zu 93,2% zur Energieübertragung bei. Die verbleibenden 6,8% werden von der Energie der Umwälzpumpe und Übertragungsleitungen durch Konvektion und Wärmeleitung aufgebracht. Da aber ein Teil der Rohre außerhalb des Gebäudes verlegt und auch der gering gedämmte Heizungsraum leicht verzögert auf die Einstrahlung reagiert, zeichnet sich ein linearer Zusammenhang ab.

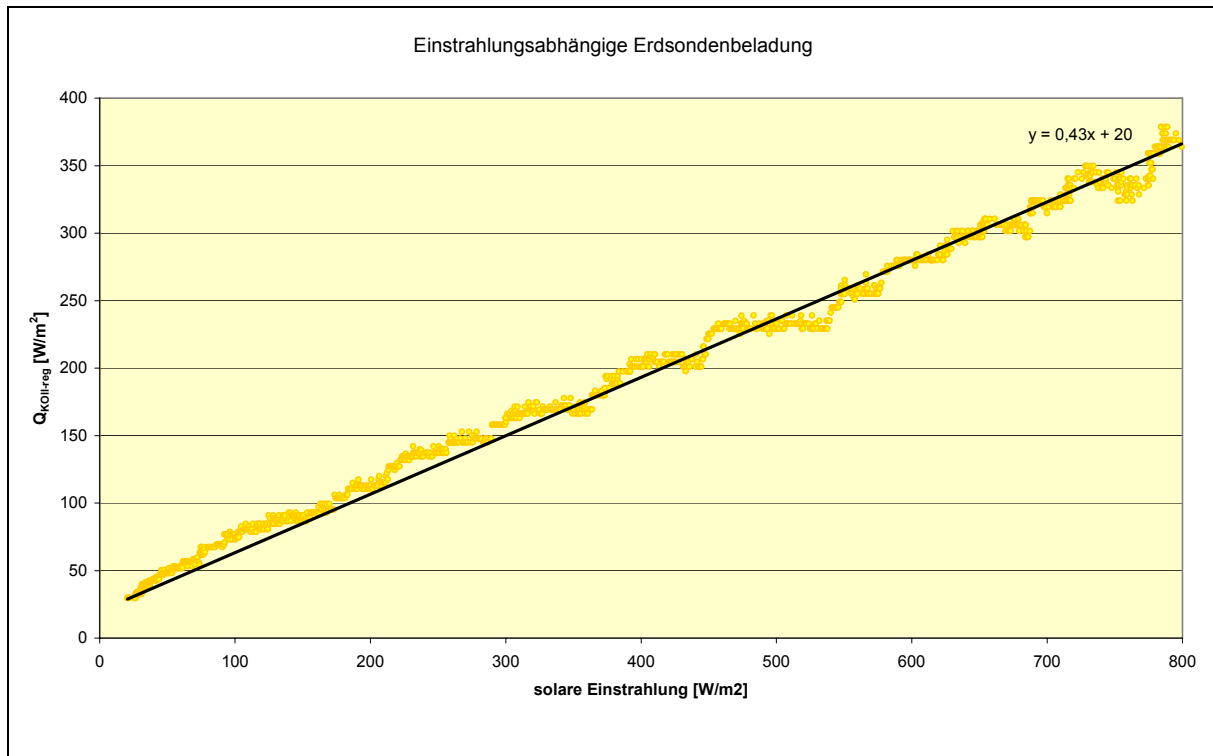


Diagramm 17 Zusammenhang zwischen solarer Einstrahlung und Erdsondenregenerierung

Berücksichtigt man jetzt noch die in das System eingebrachte Pumpenleistung von etwa 20W/m^2 Kollektorfläche, so kann man aus der Differenz in der Steigung zu dem ermittelten Wirkungsgrad von 0,39 den zusätzlichen Wärmegewinn durch das Rohrsystem ablesen. Dieser zusätzliche Wärmeeintrag wird dann auch in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** berücksichtigt.

Die Ermittlung des Speicherwirkungsgrades der Erdsonde gestaltet sich selbst unter Laborbedingungen sehr schwierig und war daher nicht direkt Gegenstand der Untersuchungen. In wie weit der ins Erdreich eingebrachte Wärmestrom wieder nutzbar dem WP-System zur Verfügung gestellt werden kann, hängt von vielen Faktoren ab. Die besonderen geologischen Bedingungen am Versuchsstand ließen auch keine Verallgemeinerung zu, durch die vorhandene Grundwasserbewegung wird der eingebrachte Wärmestrom hier schnell abtransportiert. Versuche Rechenansätze zu finden brachten keine Ergebnisse.

Die Wärmeleitfähigkeit der Erdschichten über die Tiefe von 30 m ist sehr gut. Lediglich die oberflächennahe Erdschicht in 1m Tiefe wies eine Wärmeleitfähigkeit $2,55\text{ W/m}^2\text{K}$ auf in allen anderen Schichten betrug sie zwischen $2,82$ und $2,95\text{ W/m}^2\text{K}$.

5.3.2 Erdsondenenergieentzug

In einem Teilversuch sollten Aussagen zu der Entwicklung der Bodentemperaturen in unterschiedlichen Tiefen um die Erdsonde gewonnen werden.

Zuerst wurde eine Wintersituation mit hohem Wärmebedarf nachgestellt, in welcher durch kontinuierlichen WP-Betrieb die Erdsonde stark belastet wurde. Ziel war, den Sondenbereich bis zur Vereisung möglichst weiträumig abzukühlen. Dabei sollte auch die Entwicklung der Entzugsleistung beobachtet, und im weiteren Verlauf die Regeneration dokumentiert werden. Hierfür wurde die Anlage (siehe Abbildung 7) auf M2 100% Erdsondenanteil umgestellt und die Sekundärenergie permanent an die Außenluft über einen Wasser-Luft-Wärmetauscher abgegeben.

Im zur Verfügung stehenden Versuchszeitraum war es nicht möglich, die Stillstandstemperatur genauer zu ermitteln. Der Trend jedoch war eindeutig und lief in 18,5m Tiefe im Sensorenabstand von 0,5 m zur Erdsonde gegen 6°C.

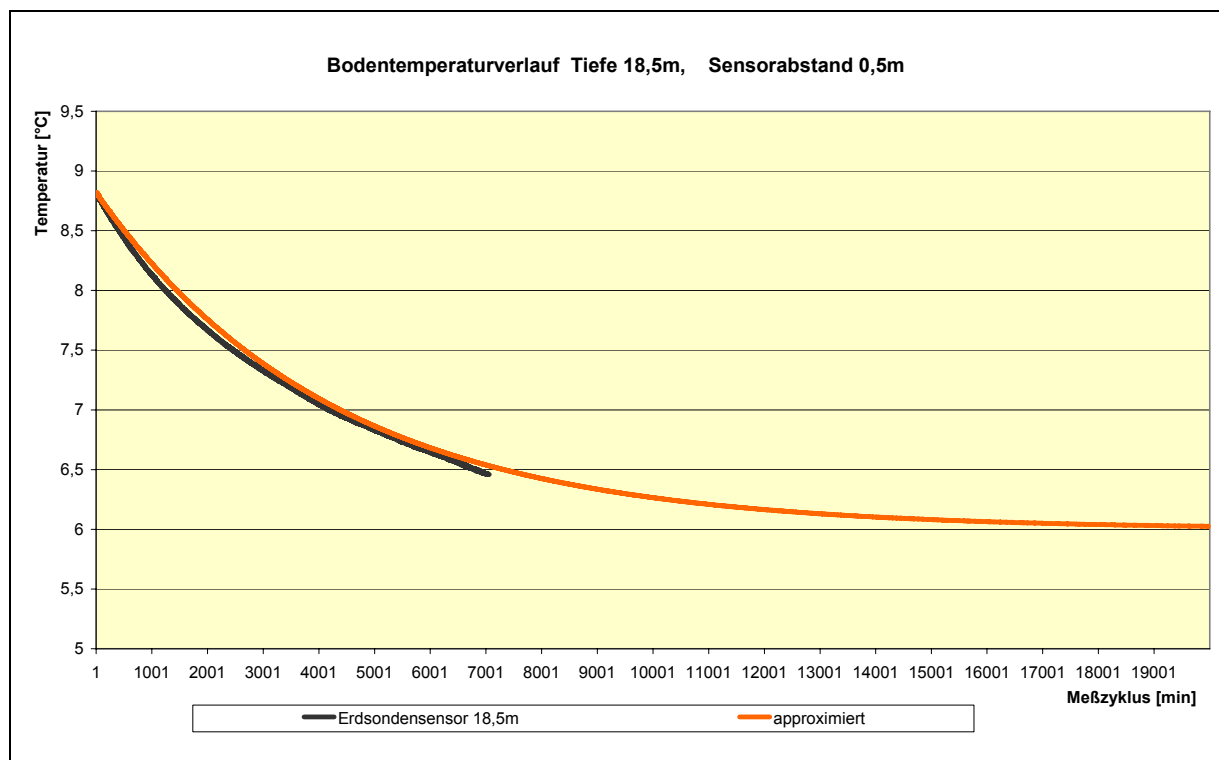


Diagramm 18 Temperaturverlauf bei 100% Erdsondenleistung

Daher wurde der weitere Verlauf der Temperatur mathematisch angenähert. Der Prozess im Umkreis der Erdsonde sollte annähernd durch das Newtonsche Abkühlungsgesetz beschrieben werden.

$$T = T_U + (T_{ES} - T_U) * e^{-k*t} \quad (13)$$

k ist sowohl vom Material des Gegenstands mit seiner spezifischen Wärmekapazität c und seiner Masse m als auch von der Wärme abstrahlenden Fläche A mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α abhängig in folgender Form:

$$k = \frac{\alpha * A}{c * m} \quad (14)$$

Durch die vorhandene Bodenbeschaffenheit und den starken Grundwassereinfluss war es nicht möglich den Wert von k mit hinreichender Genauigkeit zu ermitteln. Auch der Versuch mittels Tabellenkalkulation über die Beziehung

$$-k * t = \ln\left(\frac{T - T_U}{T_{ES} - T_U}\right) \quad (15)$$

und Mittelwertbildung aller Messungen um k zu ermitteln, brachte nicht den gewünschten Erfolg. Die Streuung der Messwerte war zu hoch.

Zum Abschluss dieses Versuchs stand immer noch eine Entzugsleistung von über 70W/m zur Verfügung. Eine Abkühlung des Erdreichs unter den Gefrierpunkt war mit einer Kälteleistung von 2,2-2,7 kW schon in 0,5m zum Sondenkörper nicht mehr möglich. Die Temperatur sank nie unter 6°C.

Verantwortlich dafür sind die besonderen geologischen Bedingungen am Standort und der hohe Grundwasserspiegel. Dieses Ergebnis wird bestätigt durch die Untersuchungen der Bohrkerne, dabei wurde eine Wärmeleitfähigkeit von λ_{ges} bis 2,98W/m*K festgestellt.

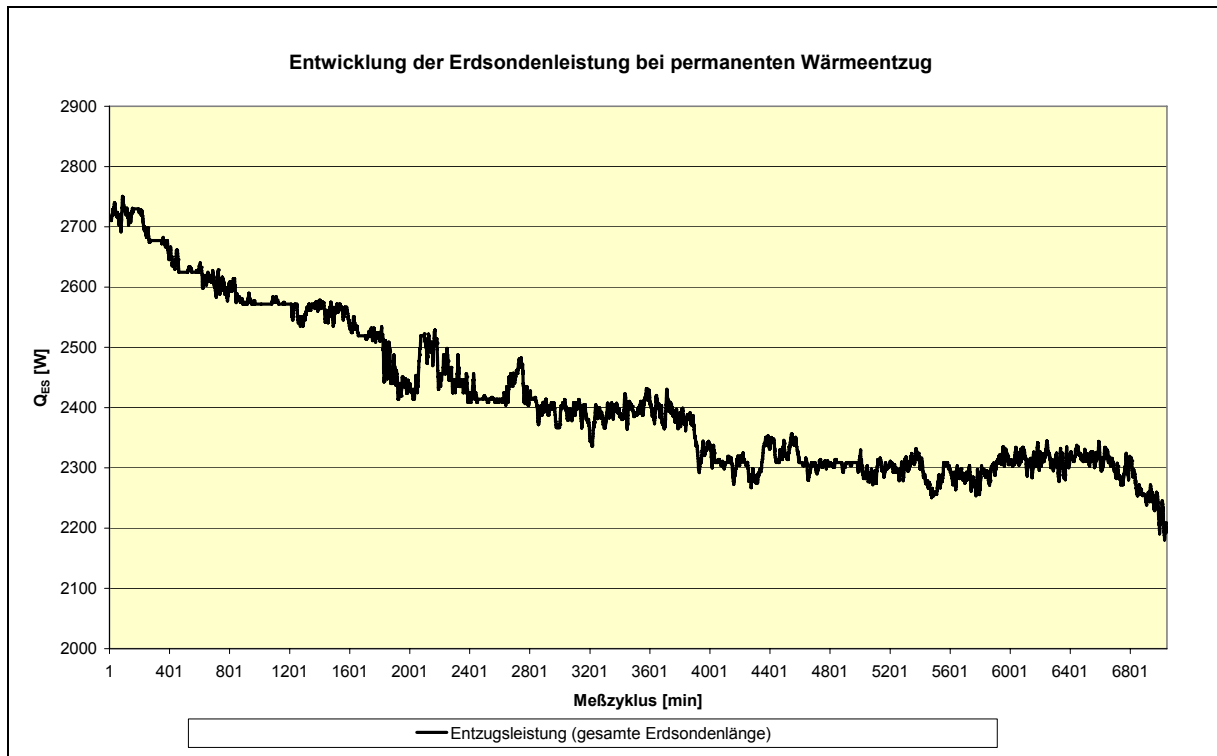


Diagramm 19 sinkende Entzugsleistung durch Erdsondenabkühlung

Diese Bedingungen erhöhen auch die Erdsondenrücklauftemperaturen, was eine Verbesserung des COP mit sich bringt. Andererseits mindern diese auch den Regenerierungsertrag des Kollektors.

Es ist davon auszugehen, dass bei der Mehrheit anderer Anlagen der spezifische Kollektorertrag im Erdsondenbeladebetrieb höher ausfallen wird als an der Versuchsanlage.

5.4 Einfluss der Pumpen auf die Energieeffizienz des WP-Systems

Pumpen sind unverzichtbare Bestandteile einer Wärmepumpenanlage. Durch die langen Einschaltzeiten im Jahr ist ihr Anteil am Gesamtenergieverbrauch eines WP-Systems hoch. Das System „SolarGeoThermie 2Q“ von RHEINZINK[®] benötigt zum vollständigen Betrieb mindestens 3 Pumpen (Erd-, Solar- und Heizkreis).

5.4.1 energieeffiziente Pumpentechnologie

Umwälzpumpen sind hydraulische Strömungsmaschinen. Aufgrund der hohen Jahreslaufzeiten (>1800h) ist der Energieverbrauch ein nicht zu unterschätzender Kostenfaktor, welcher die JAZ erheblich beeinflussen kann. Empfehlenswert ist daher der Einsatz von Hocheffizienzpumpen, welche sich trotz der höheren Investitionskosten durch eine Energieeinsparung bis zu 80% innerhalb weniger Jahre amortisieren sollen. Alle führenden Pumpenhersteller haben mittlerweile derartige Produkte der Energieeffizienzklasse A im Angebot, ausgeführt als Nassläufer-Synchronmaschinen mit ECM-Technologie.

Diagramm 20 zeigt die Verbesserung des Pumpenwirkungsgrades durch den Einsatz der neuen Kleinstpumpen mit ECM-Technologie.

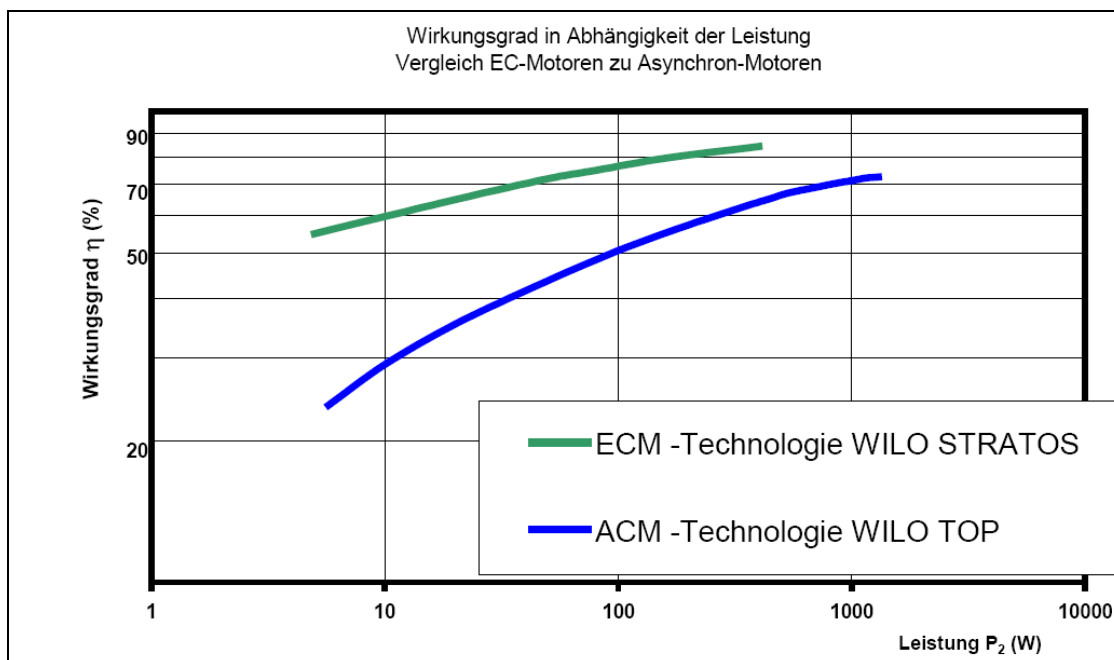


Diagramm 20 Wirkungsgrad ECM und ACM bei Kleinpumpen [21]

Besonders die Solepumpen in WP-Anlagen sind oft stark überdimensioniert.

Untersuchungen zeigten, dass deren Leistungsaufnahme oftmals 13% der Verdichterleistung übersteigt. Optimal ausgelegte Pumpen verbrauchen hingegen nur 2-4% und erhöhen dadurch die JAZ um bis zu 10% [22].

Die aufzuwendende Energie für den Fluidtransport im Kollektorkreis hat einen großen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad eines WP-Systems.

Die Druckverluste Δp_{VKoll} in den QUICK STEP® Solarmodulen werden von RHEINZINK® auf die Fluidtemperatur und Massestrom bezogen angegeben, linearisiert nach Diagramm 21.

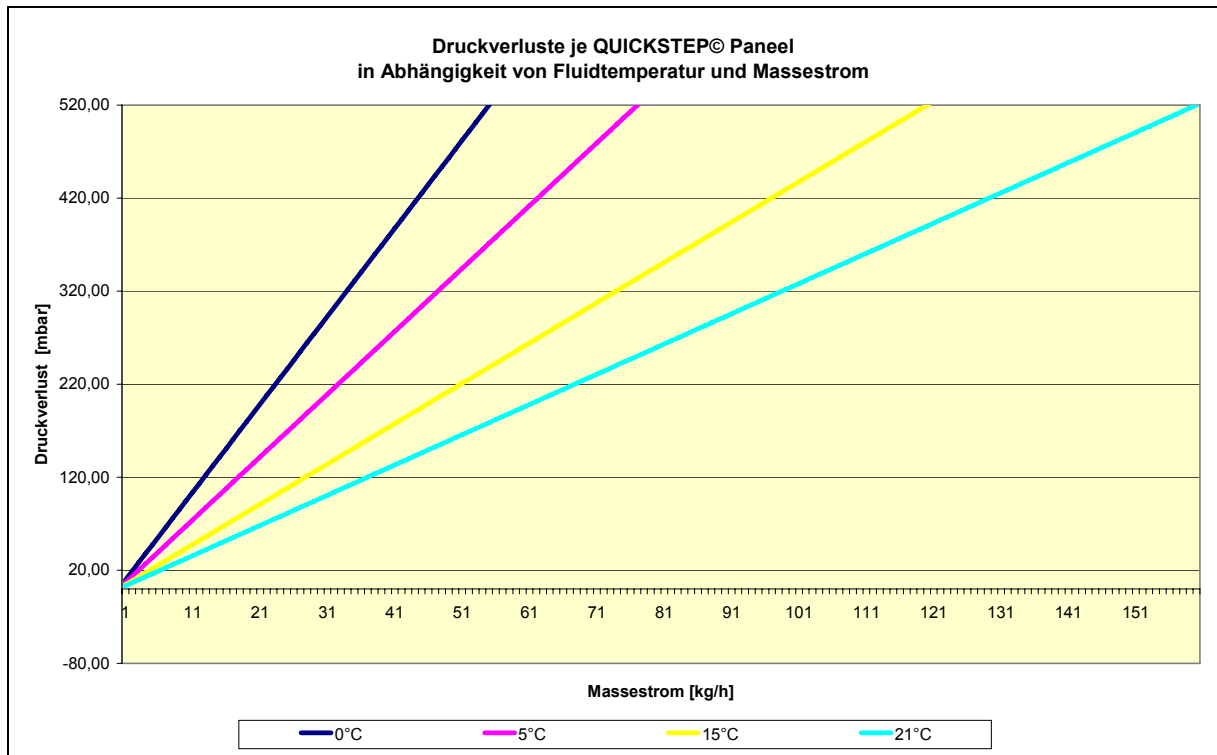


Diagramm 21 Druckverlust im Solarpaneel

Das am FBZ eingesetzte Tyfocor-Wasser-Gemisch besitzt in der angewendeten Konzentration eine Viskosität von $\nu=3,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Nach Diagramm 22 folgt daraus eine wirtschaftliche Geschwindigkeit des Mediums von 1-2 m/s, bei praxisüblichen Rohrquerschnitten.

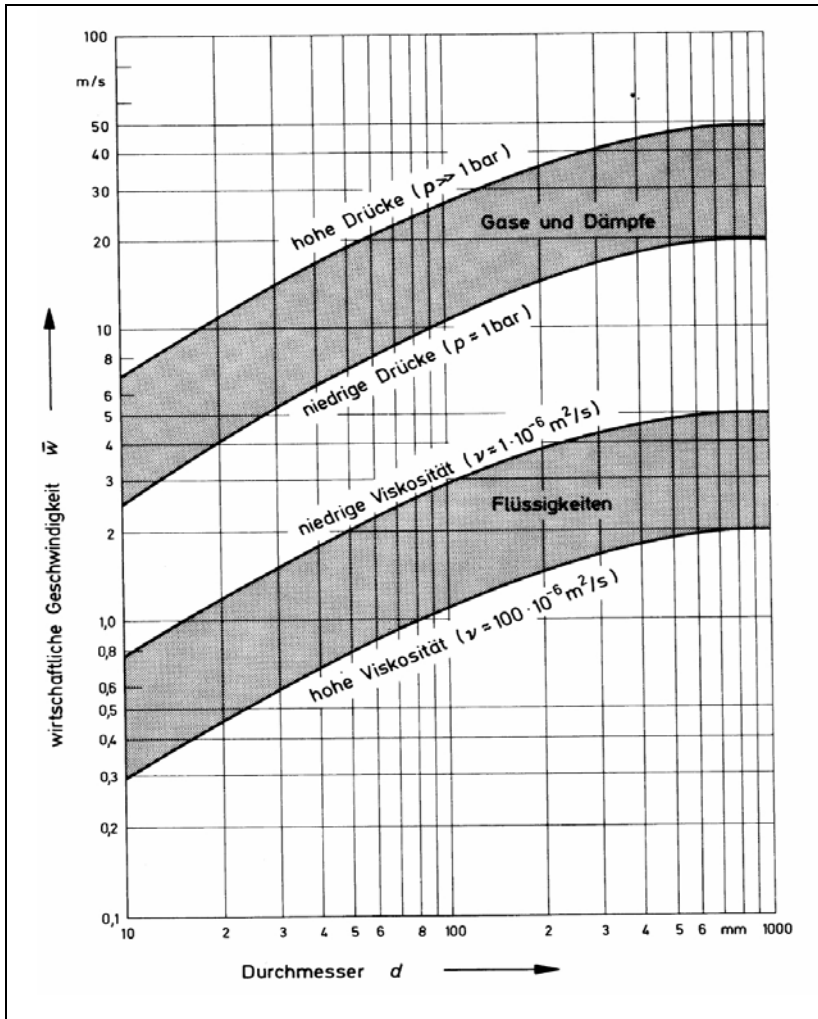


Diagramm 22 wirtschaftliche Fließgeschwindigkeiten [37]

5.4.2 Ermittlung der Pumpenleistung

Die theoretisch aufzubringende mechanische Leistung der Umwälzpumpe ergibt sich aus:

$$P_{mech.} = \Delta p_{Vges.} * \dot{V} \quad (16)$$

Diagramm 23 zeigt den Anstieg der mechanischen Leistung für unterschiedliche Rohrquerschnitte.

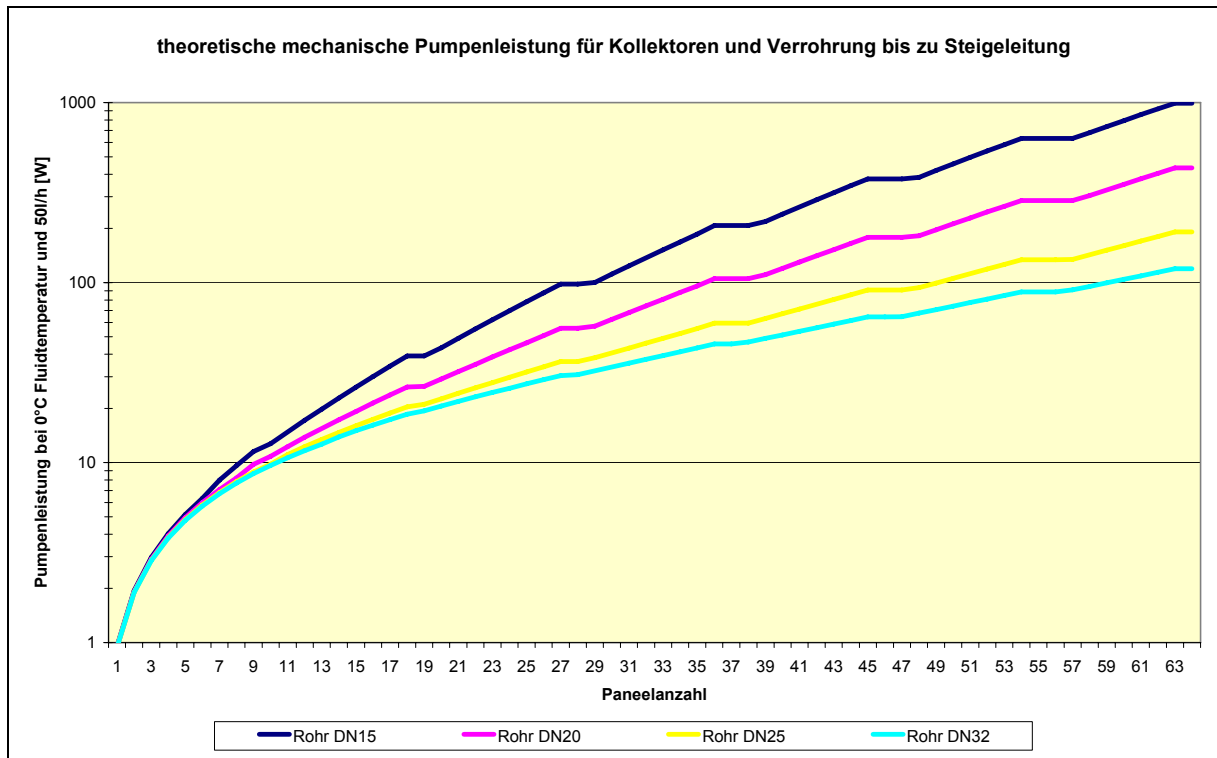


Diagramm 23 mechanische Pumpenleistung für unterschiedliche Rohrquerschnitte

Entscheidend für einen energieeffizienten Fluidtransport ist also auch in großem Maße die Dimensionierung des Rohrleitungssystems. Der Rohrrinnenquerschnitt geht mit der 5. Potenz in den Druckverlust ein und beeinflusst damit wesentlich den Energieverbrauch der Pumpe.

$$\Delta p_{VR} = \lambda * l * \rho * \frac{8}{\pi^2} * \frac{\dot{V}^2}{d^5} \quad (17)$$

Bei den steigenden Preisen für Elektroenergie ist daher eine großzügigere Auslegung der Rohrleitung überlegenswert, auch wenn sich dies kurzfristig in höheren Investitionskosten auswirkt.

Pumpen weisen immer Verluste auf und setzen einen Teil der Energie in Schwingungen oder Wärme um. Der reale Leistungsbedarf des Pumpenmotors ergibt sich daher aus:

$$P_{el.} = \frac{\Delta p_{Vges.} * \dot{V}}{\eta_{Pumpe} * \eta_{Motor}} \quad (18)$$

Um herstellerunabhängig anschauliche Ergebnisse darstellen zu können, wurde vereinfacht ein hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad von 40% und ein Motorwirkungsgrad von 90% angesetzt.

Eine untere Leistungsaufnahme von 10W ist praxisgerecht (z.B. WILO TOP-E 30/1-7).

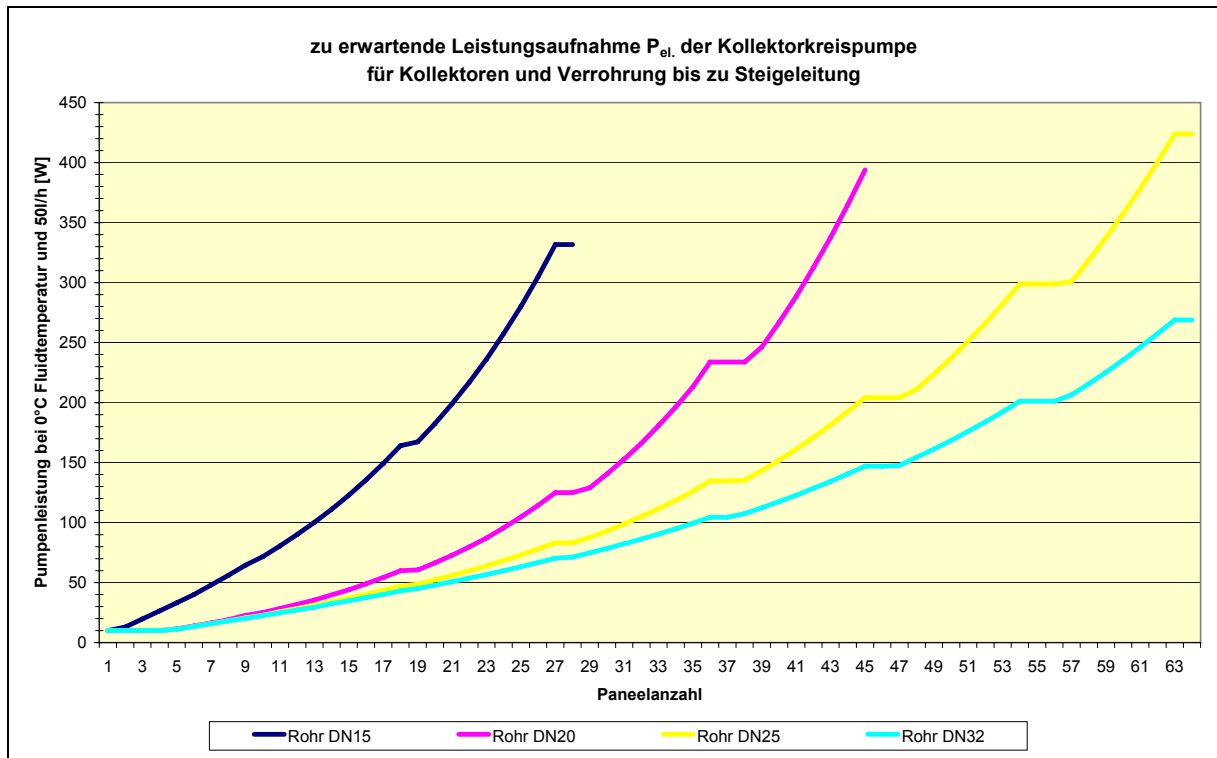


Diagramm 24 Einfluss des Rohrquerschnitts auf die Pumpenleistung

5.4.3 Pumpenenergiekosten und Einfluss auf die JAZ

Zur Veranschaulichung wurden die vorab genannten Daten auf ein praxisnahes WP-Modell unter Berücksichtigung der Anlagen- und Dimensionierungsempfehlungen des ISFH Hameln angewandt.

Ausgehend von einem Gesamtwärmebedarf von $Q_{ges}=24\text{MWh}$ wurden folgende Werte angenommen:

- Fabrikat Waterkotte Typ DS 5014.3 (P_{Wpabg} 11,8KW; P_{el} 2,6 KW; COP 0/35 4,53) [35]
- ; $T_{WP-Prim-VL}$ 0°C
- Regenerationsbetrieb $t_{ES-Bel.exkl.} = 0,5 * t_{WP-Betr.}$
- 50% der Betriebsstunden exklusive Erdsondenentladung
- 50% der Betriebsstunden gemeinsamer Betrieb beider WQA
- Netto-Arbeitspreis inkl. Stromsteuer 16,5 Cent zzgl. 19%Ust. [23].
- Kollektorstromströme von 30-60l/h
- Leistungsaufnahme Erdsondenkreispumpe 80W

- 1bar Druckverlustannahme im Erdsondenkreis und den Steigeleitungen (Erdsonde 0,2bar; WP-Primärwärmetauscher 0,25bar; Steigeleitungen 0,3bar; weitere Einbauten 0,25bar)

Dazu wurde die Entwicklung des Pumpenstroms und der JAZ in Abhängigkeit von Kollektorgröße und Volumenstrom näher betrachtet. Es wurden Kollektorfelder mit je 9 Modulen á 1,1m² Aperturfläche betrachtet, welche mit minimalem Aufwand nach dem Tichelmann-Prinzip verschaltet wurden (Abbildung 5)

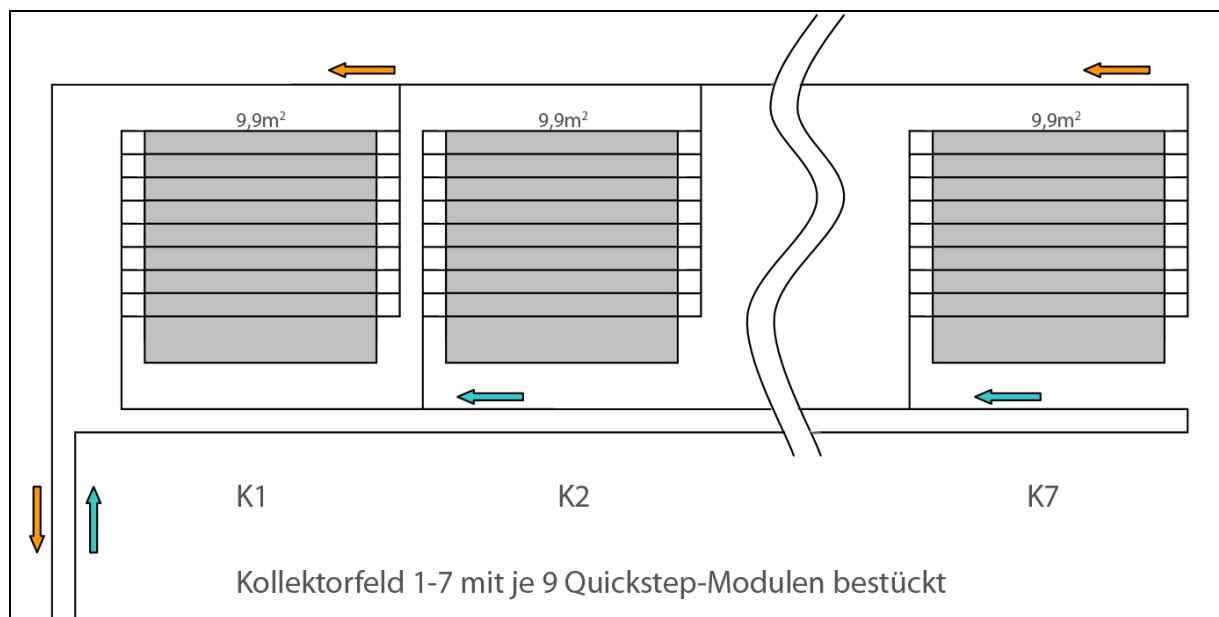


Abbildung 5 Aufbauschema zur Druckverlustberechnung (Berechnungsgrundlage)

Die Dimensionierung der Rohrleitungen erfolgte angemessen nach Diagramm 22 mit DN15-DN32. Als Wärmeträger wurde die am FBZ verwendete Tyfocor-L[®]-Wasser Mischung mit einer Viskosität von $3,2 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ eingesetzt. Fluidtemperaturen von 0°C treten im laufenden WP-Betrieb verdampferseitig üblicherweise auf, so dass die Berechnungen darauf ausgelegt wurden.

Bei Anwendung des Auslegungsdiagramms nach Diagramm 35 und einer spezifischen Erdsondenlänge von 8m/(MWh*a) müsste die optimal ausgerichtete Kollektorfläche mit Wetterregionsfaktor 1 wie folgt dimensioniert werden:

Auslegung	$0,8 \frac{m^2}{MWh * a}$	$1,2 \frac{m^2}{MWh * a}$	$1,6 \frac{m^2}{MWh * a}$	$2,4 \frac{m^2}{MWh * a}$	$3,6 \frac{m^2}{MWh * a}$
Kollektorfläche	$24m^2$	$36m^2$	$48m^2$	$72m^2$	$108m^2$
JAZ _{Basis}	4,465	4,50	4,525	4,56	4,575

Tabelle 5 Kollektorfläche und JAZ_{Basis} für Auslegungsbeispiel nach Diagramm 40

Eine Vergrößerung der Kollektorfläche führt zu überproportional steigenden Druckverlusten. Dem kann durch in Grenzen durch Herabsetzung des Volumenstroms begegnet werden. Dazu wurde unter Anwendung bzw. Erweiterung von Diagramm 23 und Diagramm 24 für den Betrieb der Kollektorkreispumpe bei unterschiedlichen Volumenströmen die Kosten ermittelt.

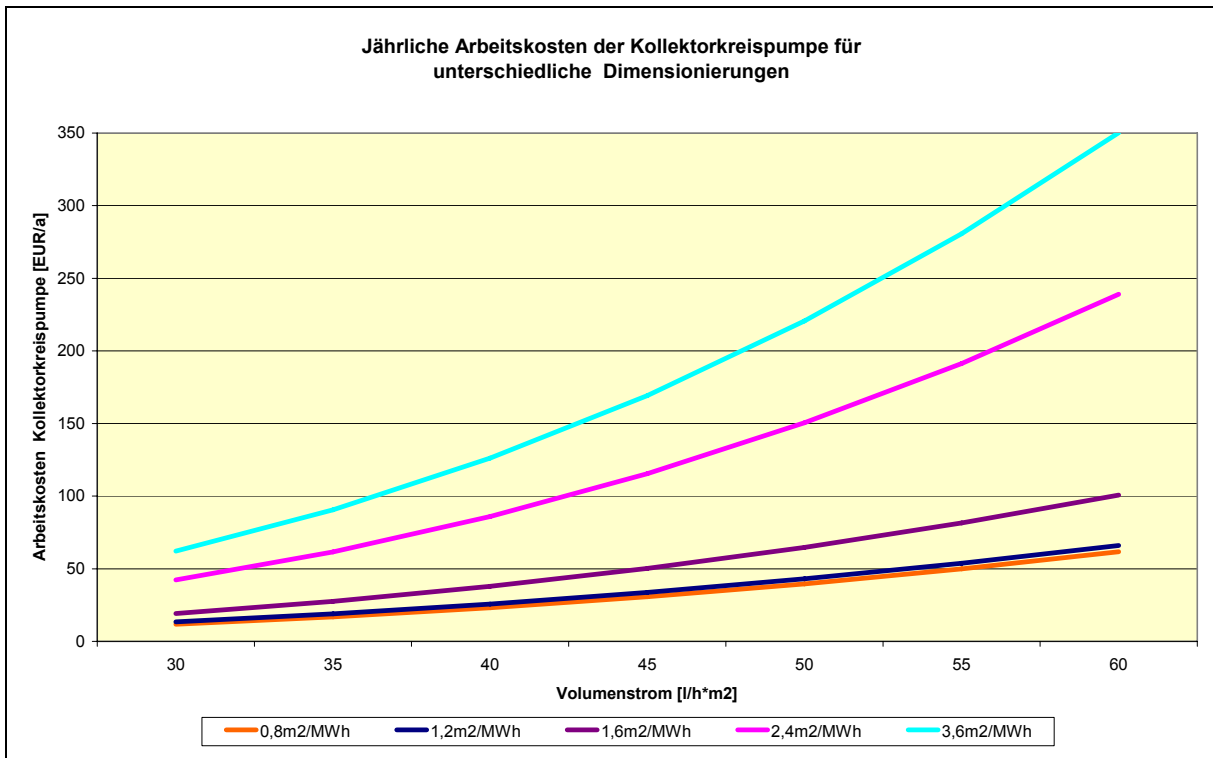


Diagramm 25 Abhängigkeit der Kosten vom Volumenstrom und Kollektordimensionierung

Die nach Diagramm 25 dargestellten Pumpenenergiekosten sind die minimal erzielbaren Werte mit einer optimal angepassten herkömmlichen Umwälzpumpe mit $\eta_{Pumpe} * \eta_{Motor} = 0,35$ im Solarkreislauf.

In der Praxis können durch überdimensionierte Pumpen weitaus höher Kosten entstehen. Dem kann allerdings durch Einsatz hocheffizienter Pumpen entgegen gewirkt werden. Einsparungen von 50% bis 80% werden von den Herstellern propagiert und treffen bei

hydraulisch abgeglichenen Systemen auch zu, was Labor- und Praxisversuche bewiesen haben.

Ohne eine Berücksichtigung der Kollektorgewinne durch höheres primärseitiges Temperaturniveau sowie Erdsondenregenerierung zeigt Diagramm 26 den bedeutenden Einfluss beider Umwälzpumpen (Erd- und Kollektorkreislauf) auf die JAZ.

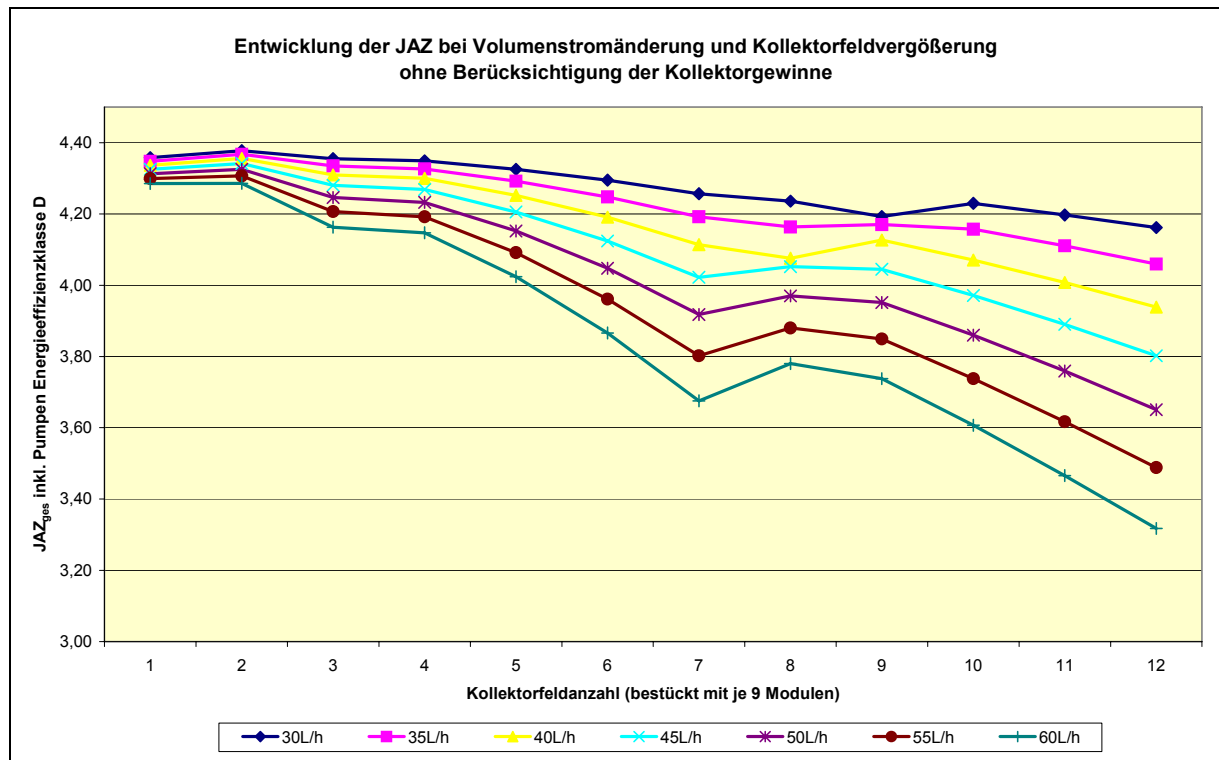


Diagramm 26 JAZ – Minderung durch steigenden Pumpenenergiebedarf (Effizienzklasse D)

Deutlich wird, dass mit wachsender Kollektorfläche die benötigte Pumpenenergie überproportional ansteigt, insbesondere bei hohen Kollektorvolumenströmen. Die leichten Anstiege der JAZ innerhalb der einzelnen Kennlinien werden durch eine notwendige Vergrößerung des Rohrquerschnitts verursacht.

Diagramm 27 zeigt den Einfluss der Energieeffizienzklasse der Umwälzpumpen auf die JAZ. Im Vergleich zu herkömmlichen Pumpen der Klasse D wurde hier eine Energieeinsparung von 50% durch den Einsatz von Pumpen der Energieeffizienzklasse A in Erdsonden- und Kollektorkreis angesetzt. Mit steigendem Volumenstrom wird die Verwendung von hocheffizienten Pumpen (blau dargestellt) immer rentabler (JAZ steigt deutlich an)

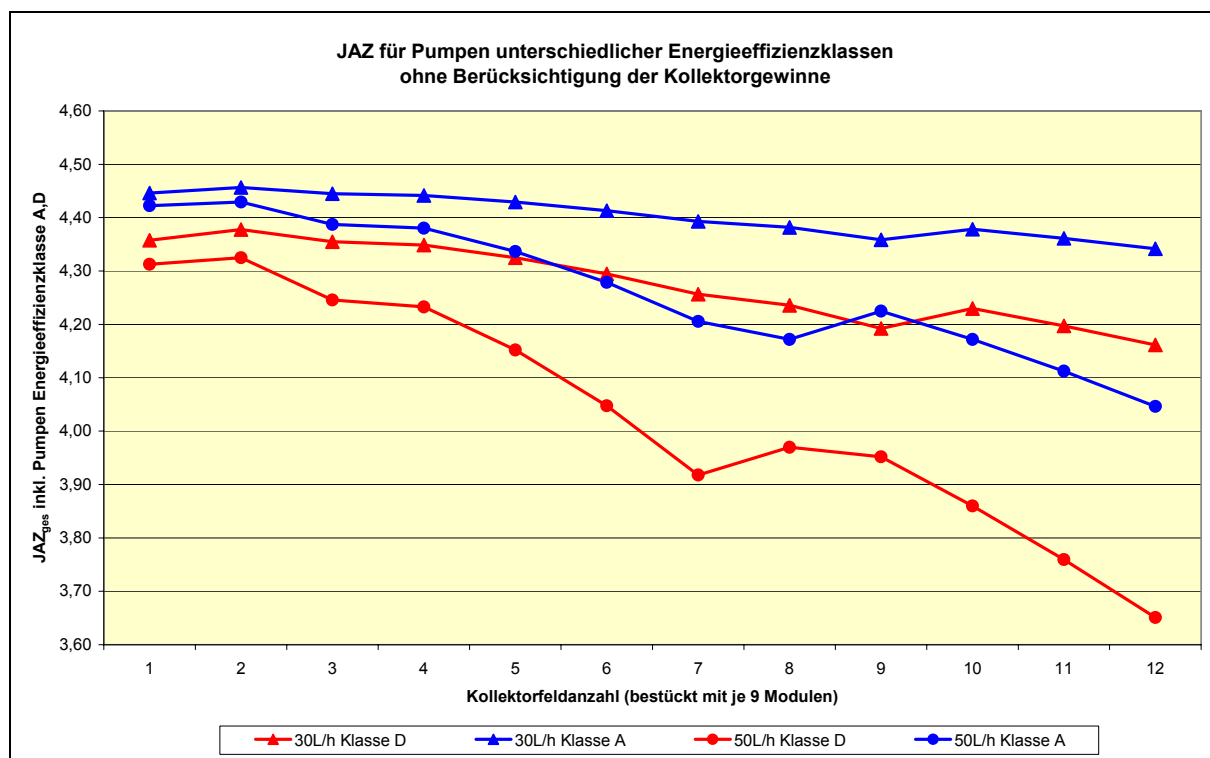


Diagramm 27 JAZ bei Einsatz von Pumpen unterschiedlicher Energieeffizienzklasse

Fazit:

Um einen möglichst hohen Anteil regenerativer Energie am Gesamtenergieaufkommen zu erreichen, sollte für jede Anlage im Einzelfall die Pumpenleistung genau ermittelt und bei der Kollektordimensionierung berücksichtigt werden.

Eine optimale Auslegung des Fluidstromes und des Rohrquerschnitts hat entscheidenden Einfluss auf die JAZ. Die Rohrleitungen sollten großzügiger dimensioniert werden.

Der Einsatz von Pumpen der Energieeffizienzklasse A empfehlenswert.

5.4.4 Volumenstrom im QUICK STEP® Solarmodul

Der von RHEINZINK® empfohlene Fluidstrom von 50l/h*m² führt besonders bei größeren Kollektorflächen zu großen erforderlichen Pumpenleistungen und reduziert dadurch die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems. Um nachzuweisen, dass kleinere Volumenströme nur geringe Mindererträge verursachen, wurden unterschiedliche Fluidmengen im Kollektor unter ähnlichen Anlagenbedingungen gegenüber gestellt.

Volumenstrom je m ² Kollektorfläche	$60 \frac{l}{h * m^2}$ 28.07.2008	$30 \frac{l}{h * m^2}$ 07.08.2008	$22 \frac{l}{h * m^2}$ 17.08.2008
solare Einstrahlung $\frac{kWh}{d * m^2}$	7,72	7,53	7,17
Tagesdurchschnitts- Temperatur [°C]	28,31	28,97	20,32
Kollektorertrag $\frac{kWh}{d * m^2}$	3,58	3,83	2,93
Kollektorwirkungsgrad (einstrahlungsbezogen)	0,46	0,50	0,41

Tabelle 6 Unterschiedliche Volumenströme bei ähnlicher Witterung

Beachtlich ist hierbei besonders der Vergleich von 30 und 60l/(h m²) Volumenstrombetrieb aufgrund gleich langen WP-Betriebs und der fast identischen Wetterbedingungen. Diagramm 28 zeigt, dass kaum Unterschiede im Kollektorertrag zu verzeichnen sind, nachdem die WP-Schaltzyklen zur Speichertemperatur abgeschlossen sind.

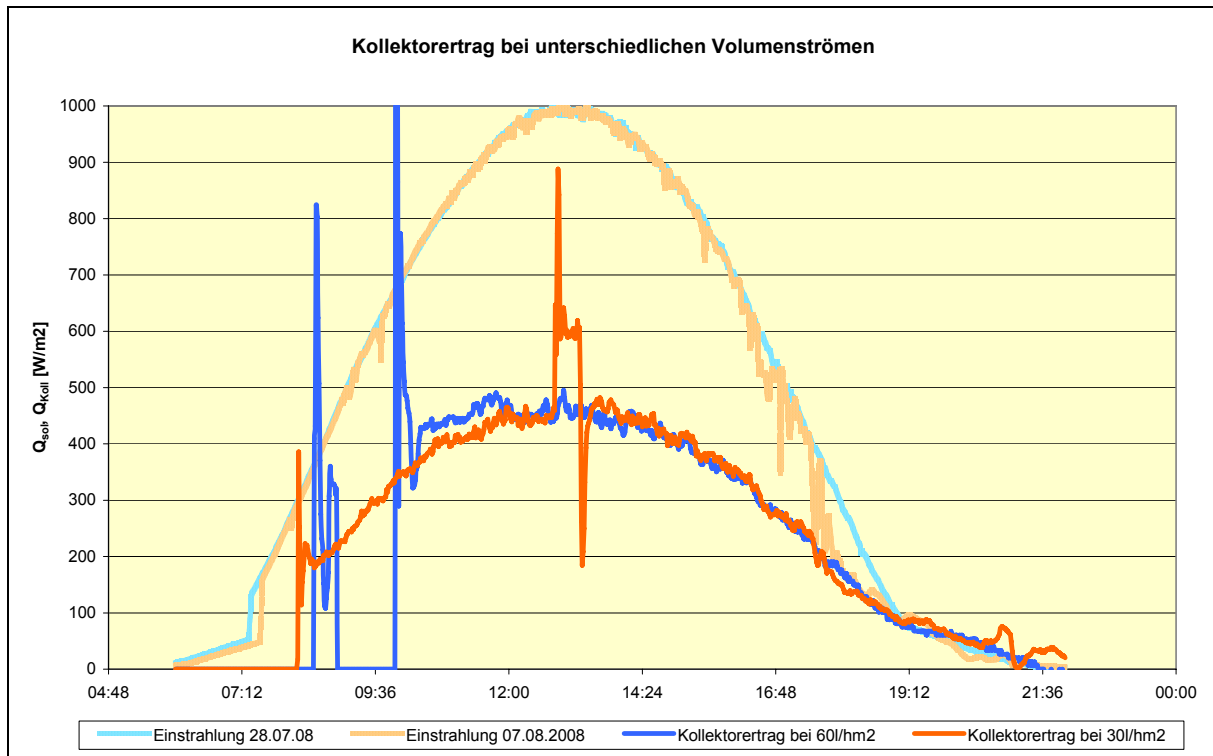


Diagramm 28 Einfluss unterschiedlicher Kollektorzvolumenströme

Empfehlung:

Eine Volumenstromreduzierung auf ca. 30 – 40 l/(h*m²) führt nur zu geringen Ertragseinbußen, senkt aber den Stromverbrauch der Pumpe erheblich.

6 Erarbeitung einfacher Dimensionierungsempfehlungen

Jede geo-solare WP-Anlage verfügt über eine Menge von Variablen, die Einfluss auf den Kollektorertrag haben. Unterschiedliche Anlagenbedingungen (Kollektorstandort, geologische Struktur, WP-Auslegung, etc.) und deren Kombinationen machen es problematisch, die am Versuchsstand gewonnenen Erkenntnisse zu verallgemeinern. Das

Verhältnis von Erdsondenlänge 30m und Kollektorfläche 6,6m²
$$n_{ES-Koll} = 4,55 \frac{m_{ES}}{m_{Koll}^2}$$

entspricht aber den mittleren Auslegungsbedingungen des ISFH (siehe Diagramm 35), so dass man mittels empirischer Verfahren für Aussagen für durchschnittlich dimensionierte Anlagen treffen kann.

Die am Versuchsstand installierte WP-Anlage verfügt aufgrund ihres Alters und der verwendeten Komponenten nicht über einen vergleichbaren COP wie moderne Systeme. Die Fluidtemperaturen, Volumenströme und Anlagenverhältnisse primärseitig sind allerdings gut vergleichbar. Daher beschränken sich die Aussagen auf den tatsächlich erzielten Ertrag und dem Verhältnis der Energiequellen ohne Einbeziehung des COP.

6.1 Kollektorertrag

Die Rückführung des Kollektorgewinns auf einen einstrahlungsabhängigen Anteil und einen Temperaturanteil bietet die Möglichkeit, sehr einfach und schnell eine erste Prognose zum Jahresertrag zu treffen.

Der empirisch ermittelte Strahlungswirkungsgrad wird bei optimaler Ausrichtung mit $\eta_{Str.Koll.} = 0,41$ angegeben und durch einen Korrekturfaktor nach Diagramm 12 auf andere Positionierungen korrigiert.

Die konvektiven und kondensativen energetischen Gewinne sind stark von der Umgebungstemperatur des Kollektors abhängig. In den Versuchsreihen zeigte sich dafür ein Anteil an der Gesamtentzugsleistung von $8,5 \cdot 12 \frac{W}{m^2 K}$ Außentemperatur (siehe Tabelle 2), insbesondere abhängig von Wind, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag.

Als Berechnungsansatz sollte bei normalen Klima der Wert von $8,5 \frac{W}{m^2 K}$ verwandt werden.

Daraus ergibt sich für neue Anlagen eine Abschätzung des Ertrags mit

$$Q_{J-spez.Koll} \approx \frac{t_{WP-Betr.}}{a} \left[0,171 * Q_{J-spez.sol.} * 0,41 * \eta_{Str.korr.} + 1,5 * 8,5 \frac{W}{m^2 * K} * g_{AU} \right]$$

Für bestehende Anlagen und bei bekannter Gesamtbetriebsstundenzahl (WP-Betrieb und Erdsondenregenerierung) die genauere Prognose:

$$Q_{spez.KollErtr.} \approx \frac{t_{WP-Betr.} + t_{ES-Bel.}}{8760h} * \left[Q_{J-spez.sol.} * 0,41 * \eta_{Str.Korr.} + \frac{8,5 \frac{W}{m^2 * K} * g_{AU} * 8760h}{a} \right]$$

6.2 Reduzierung der Erdsondentiefe

Erdsonden werden nach dem zu erwartenden jährlichen Energieentzug oder der Heizlast ausgelegt.

Aus dem jährlichen Heizwärmebedarf (Warmwasserbereitung war nicht Bestandteil der Untersuchungen) und dem COP der Wärmepumpe lässt sich der jährliche Wärmeenergieentzug aus der Erdsonde berechnen:

$$Q_{J-ES} = Q_{J-H} * \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad (19)$$

Nach VDI 4640 kann die Auslegung nach der spezifischen Entzugsleistung [W/m] für angenommene 1800 Betriebsstunden oder der spezifischen Jahresentzugsenergie [kWh/m*a] erfolgen, siehe Tabelle 7.

Untergrund	spez. Entzugsleistung [W/m] (1'800 Betriebsstunden)	spez. Entzugsenergie [kWh/m*a]
Schlechter Untergrund mit $\lambda < 1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	20	
Normaler felsiger Untergrund, wassergesättigtes Sediment mit $\lambda = 1.5\text{-}3.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	50	80
Festgestein mit $\lambda = > 3.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	70	
Sand, Kies trocken	< 20	
Sand, Kies wasserführend	55 - 65	
Ton, Lehm feucht	30 - 40	
Kalkstein (massiv)	45 - 60	
Sandstein (Molasse)	55 - 65	
Basalt	35 - 55	
Granit	55 - 70	
Gneis	60 - 70	
Sand Kies mit starken Grundwasserfluss	80 - 100	

Tabelle 7 Entzugsleistung und Entzugsenergie für Anlagen <20KW [24]

Für normale Bodenstrukturen ist die Berechnung der Erdsondenlänge über die jährliche Entzugsenergie die etwas sichere Variante, es ergibt sich meist eine größere Sondenlänge.

$$l_{\text{Sonde}} = \frac{Q_{J-ES}}{80 \text{ kWh}(m^* a)} \quad (20)$$

Dem Sondenentzug von 80kWh/(m²*a) kann nicht einfach der Kollektorertrag entgegengesetzt werden (am Versuchsstand immerhin 650kWh/(m²*a), auch wenn die Jahresenergiebilanz dann zu stimmen scheint. Während der Heizperiode würde dieses zu einer Verschlechterung des COP führen, da in den Wintermonaten aufgrund der Wetterbedingungen die Kollektorvorlauftemperatur sinkt.

Um einen optimalen Heizbetrieb zu gewährleisten, sollten bei der Erdsondenreduktion die Kollektorgewinne der Monate Dezember/ Januar angesetzt werden.

Die Laufzeit der WP ist in diesen Monaten überdurchschnittlich hoch, daher wurde bei der Abschätzung der Betriebsstunden auf die Gradtagzahlen nach VDI-Richtlinie 2067 zurückgegriffen (Tabelle 8).

im Monat	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
% pro Tag	5,48	5,36	4,19	2,67	1,29	0,44	0,43	0,43	1,00	2,58	4,00	5,16
% pro Monat	170	150	130	80	40	40/3	40/3	40/3	30	80	120	160

Tabelle 8 Mittlere Gradtagzahlen nach VDI-Richtlinie 2067 GTZ20/15

Danach kann die Einschaltdauer der WP durch Addition der Promille-Werte mit

$$\frac{170 - 160}{1000} = 0,33 = 33\% \text{ der Jahresbetriebsstunden angesetzt werden.}$$

Für eine hinreichend genaue Abschätzung der Einstrahlung wurden zuerst Messdaten des Lowell-Photovoltaik-Programms hinzugezogen. Demnach kann in Deutschland in der

Summe mit $Q_{\text{Dez-Jan-spez.sol}} = 35 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ gerechnet werden, das entspricht nur etwa 3,5% der

Jahreseinstrahlung [25].

Dem gegenüber steht aber eine am FBZ auf Kollektorebene gemessene Strahlungsenergie

von $Q_{\text{Dez-Jan-spez.sol}} = 80 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ für Dezember und Januar. Dies erklärt sich aus der tief

stehenden Sonne und der Abhängigkeit der Einstrahlung vom Einfallswinkel, die in etwa dem Kosinus der Orthogonalen zur Aperturfläche entspricht. Der Anstellwinkel von 45° ist

praxisnah, so dass als Rechenansatz dann auf die ermittelten 8% der Jahreseinstrahlung zurückgegriffen wurde.

Als Durchschnittstemperatur für Dezember zeichnete sich ein Wert von 4,4°C und für Januar 5,7°C ab. Das ergibt nach Formel 9

$$Q_{\text{Dez-Jan-spez.Koll}} \approx \frac{80\text{kWh}}{\text{m}^2} * 0,39 * \frac{600\text{h}}{1488\text{h}} + 4,4\text{K} * 8,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} * 300\text{h} + 5,7\text{K} * 8,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} * 300\text{h} \approx \underline{\underline{38 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}}$$

Nach VDI 4640 wird ein spezifischer WP-Jahresbetrieb von $\frac{80\text{kWh}}{1800\text{h}}$ je Sondenmeter

angesetzt. Ein Drittel der Stunden fällt davon nach VDI 2067 auf Dezember und Januar.

Demnach wird der Erdsondenentzug für die beiden ertragärmsten Monate angegeben mit

$$Q_{\text{Dez-Jan-spez.ES}} \approx \frac{80\text{kWh}}{1800\text{h} * \text{m}} * 600\text{h} \approx \underline{\underline{26,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}}}}$$

Setzt man nun den Kollektorsertrag ins Verhältnis zum Erdsondenentzug so erhält man

$$\frac{Q_{\text{Dez-Jan-spez.Koll}}}{Q_{\text{Dez-Jan-spez.ES}}} \approx \frac{38 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{26,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}}} \approx \underline{\underline{1,42 \frac{\text{m}}{\text{m}^2}}}$$

Das bedeutet, 1m² installierter Kollektorfläche spart mindestens 1,4m Erdsondenlänge ein, unter den angegebenen Wetterbedingungen und richtiger Auslegung der WP-Systems.

6.3 Größenverhältnis Erdsondenlänge zu Kollektorfläche

Allerdings kann der Ersatz von Erdwärmesonde durch Kollektorfläche nicht in beliebiger Höhe erfolgen. Bspw. müssen die Volumenströme von Kollektorfläche und Erdsondenanlage in Grenzen aufeinander abgestimmt sein, um Druckverluste zu vermeiden und eine ausreichende Temperaturspreizung zu gewährleisten. Auch wirkt der Speichereffekt des Erdreichs (Winter Entzug, Sommer Regeneration) positiv auf die WP.

Gelegentlich treten auch besonders kalte, einstrahlungsarme Tage auf. An diesen muss, wenn ($T_{AU} < T_{Koll-RL}$), mit einem Totalausfall der Kollektorleistung gerechnet werden. Daher sollte ein Erdsondenanteil von mindestens 75% beibehalten werden, das würde temporär zu einer Entzugsleistung von

$$\dot{Q}_{spez.ES} = \frac{80kWh}{0,75 * 1800h * m} = 59 \frac{W}{m}$$

führen, was vertretbar ist. Höhere Entzugsleistungen sind nicht zu empfehlen, insbesondere bei feucht-lehmigen Schichten kann es bei weiträumiger Vereisung des Bodens zu Rissbildungen im Sediment kommen. Diese Veränderungen verringern die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, beeinträchtigen damit die Wärmeenergieübertragung und sollten unbedingt vermieden werden [13].

Es kann auch ein größerer Kollektoranteil als 25% der WQA dimensioniert werden, bei temporärer elektrischer Zusatzheizung (bivalente monoenergetische Betriebsweise) für die kältesten Tage des Jahres. In den wärmeren, einstrahlungsreicheren Monaten steigt dann der Kollektorertrag erheblich, was zu höheren Kollektorvorlauftemperaturen führt und die JAZ positiv beeinflussen kann. Dieses war aber nicht Gegenstand der Untersuchungen

6.4 Vollständige Regeneration der Erdsonde

Um die Erdsondenregeneration mit Hilfe der Kollektorfläche beziffern zu können, wurden Bedarf und Angebot über die einzelnen Monate betrachtet. Aus Diagramm 31 wird ersichtlich, dass sich Heizenergiebedarf und Kollektorenergieangebot gegensätzlich entwickeln. Ab Mai überwiegt bis September das Wärmeangebot des Kollektors. Für diesen Zeitraum wurde eine vollständig ausgeglichene Energiebilanz als Rechengrundlage angenommen:

$$- Q_{J-ES} = Q_{Mai - August - exkl. Koll}$$

In den ertragreichsten Monaten Mai-August ist der Energiebedarf am Geringsten, zusammen nur $0,08 * Q_{J-H}$ nach DIN 2067. Zeitgleich sind die Außentemperaturen im Schnitt mit 13-19°C über den Erdtemperaturen und es fallen auch rund 60% der Jahreseinstrahlung auf diese Monate, je nach Region etwa 600kWh/m² [16].

Aufgrund des Kollektoranstellwinkels erreichte die Versuchsanlage in dem Zeitraum Einstrahlungswerte von 800kWh/m^2 . Die gemessene Durchschnittsaußentemperatur betrug $18,62^\circ\text{C}$ und eine tägliche Betriebsdauer von etwa 10h wurde erreicht. Für den Zeitraum 123 Tage würde sich ein Beladebetrieb von $123 \cdot 10\text{h} = 1230\text{h}$ ergeben, tatsächlich erreicht wurde ein Regenerationsbetrieb von 1021 Stunden, da die Erdsonde frühzeitig ihr Ausgangstemperaturniveau wieder erreichte (siehe Diagramm 29). Von den möglichen Regenerationsstunden wurde noch die Einschaltzeit der WP

$$t_{Pu} = 0,08 \cdot t_H = 1800\text{h} \cdot 0,08 = 144\text{h}$$

abgezogen und dann die Näherungsformel auf diese Monate angewendet ergibt sich:

$$Q_{\text{Mai-August-exkl.Koll}} \approx \frac{1230\text{h} - 144\text{h}}{1230\text{h}} \cdot \left[\frac{800\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 0,39 + 18,62\text{K} \cdot 8,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \approx 440 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Setzt man diesen möglichen Ertrag im Beladebetrieb in Beziehung zur Erdsondenlänge kann eine konkrete Aussage über das spezielle Regenerationsvermögen getroffen werden:

$$\frac{Q_{\text{Mai-August-exkl.Koll}}}{Q_{\text{J-spez.ES}}} = \frac{440 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{80 \frac{\text{kWh}}{\text{m}}} = 4,5 \frac{\text{m}}{\text{m}^2}$$

Es sollte demnach also möglich sein, mindestens **4,5m Sondenlänge/m²**

Metalldachkollektor vollständig zu regenerieren.

Der WP-Betrieb im Versuchszeitraum zeigte dann auch eine erhebliche Entlastung der Erdsondenwärmequelle durch das Kollektorfeld. Allerdings wurde, aufgrund des milden Winters nur selten ein Außentemperaturwert unterhalb der mittleren Kollektorfluidtemperatur erreicht. Die Auslegungstemperatur wurde nie tangiert. Des Weiteren erfolgte im Dezember kein Erdsondenentzug, weil andere Versuchsreihen an der Anlage durchgeführt wurden. Zu Junibeginn hatte sich daher der Erdspeicher bereits vollständig regeneriert.

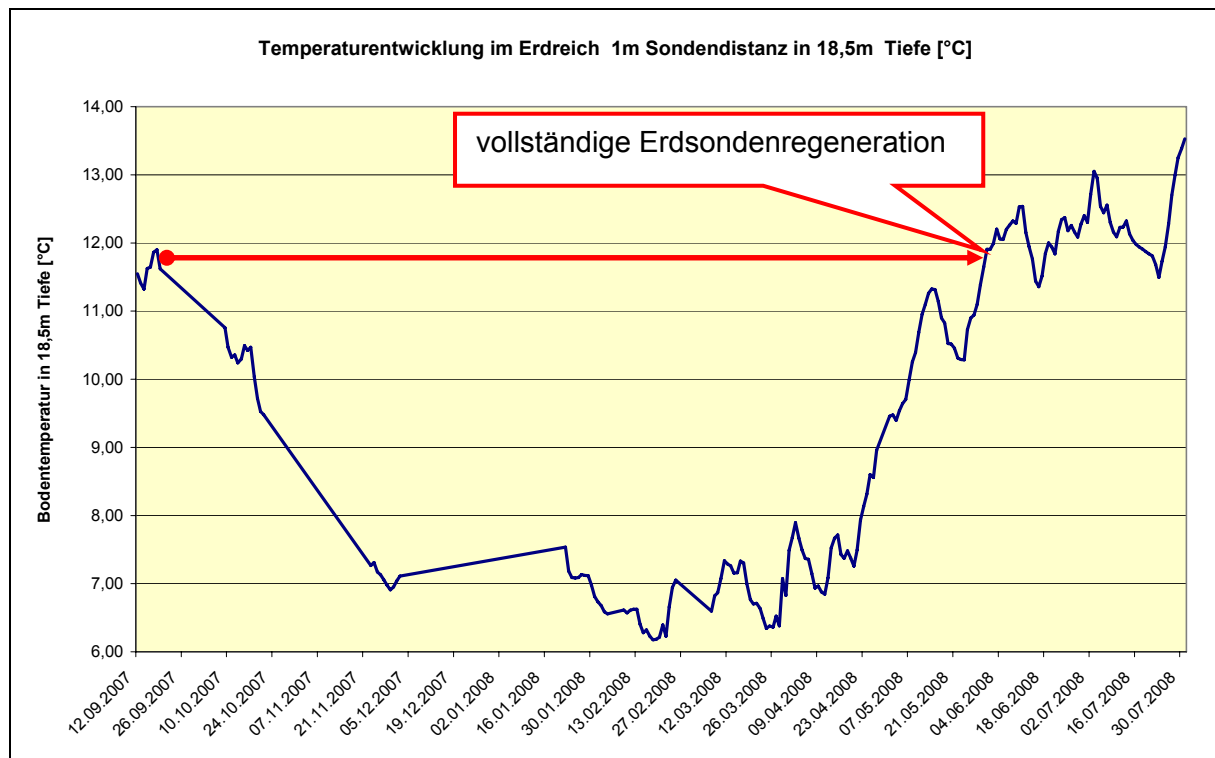


Diagramm 29 Entwicklung der Erdsondentemperatur

7 Zusammenfassung zur Simulation Einfamilienhaus

Ziel des Einsatzes der RHEINZINK[®]-Metалldachkollektoren ist eine Erhöhung der Jahresarbeitszahl und damit eine Senkung der Kosten für Heizenergie Q_{J-H} . Das ist über eine Erhöhung des primärseitigen Temperaturniveaus gegeben, welche direkt über eine höhere Mischtemperatur oder indirekt über die Regeneration der Erdsonde erfolgt. Des Weiteren können dadurch projektabhängig die Erdreichwärmeübertrager (vertikal und horizontal) geringer dimensioniert und somit Investitionskosten reduziert werden. Die am Versuchsstand gewonnenen Erkenntnisse sind nur eingeschränkt direkt in die Praxis übertragbar. So bieten viele Stromversorgungsunternehmen für den WP-Betrieb spezielle Tarife an, die mit partiellen Abschaltungen verbunden sind. Diese Schaltzeiten wurden in der Versuchsanlage nicht simuliert.

7.1 Wetter

Der hier betrachtete Zeitraum erstreckt sich vom 11.09.2007 bis 22.08.2008, unterbrochen vom Dezember, in welchem in einer weiteren Versuchsreihe die Vereisung der Kollektoren näher untersucht wurde.

Wetteraufzeichnung im Versuchszeitraum (Mittelwerte)			
Temperatur $T_m [^{\circ}C]$	solare Einstrahlung $Q_{m-sol_Kollektorebene} \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$	Windgeschwindigkeit $w_{m-w} \left[\frac{m}{s} \right]$	relative Luftfeuchte $\varphi_m [\%]$
11,25	1337 (auf Kollektorebene)	2,09	80,9

Tabelle 9 Zusammenfassung der Wetterdaten

7.2 Zusammensetzung des Energieaufkommens, Simulation EFH

Der relativ milde Winter führte zu einem geringeren Heizenergiebedarf als erwartet, gleichzeitig konnte mit einem überproportionalen Ertrags des Kollektorfeldes gerechnet werden.

Es wurde notwendig, die Datenaufzeichnung am WP-System immer wieder temporär zu unterbrechen. Um die einzelnen unvollständigen Monate nach Diagramm 30 darstellen zu können, wurden Tagesdurchschnittswerte gebildet und entsprechend der Monatstagesanzahl kumuliert. Diagramm 30 zeigt die Zusammensetzung der einzelnen Energieanteile über die Versuchsmonate.

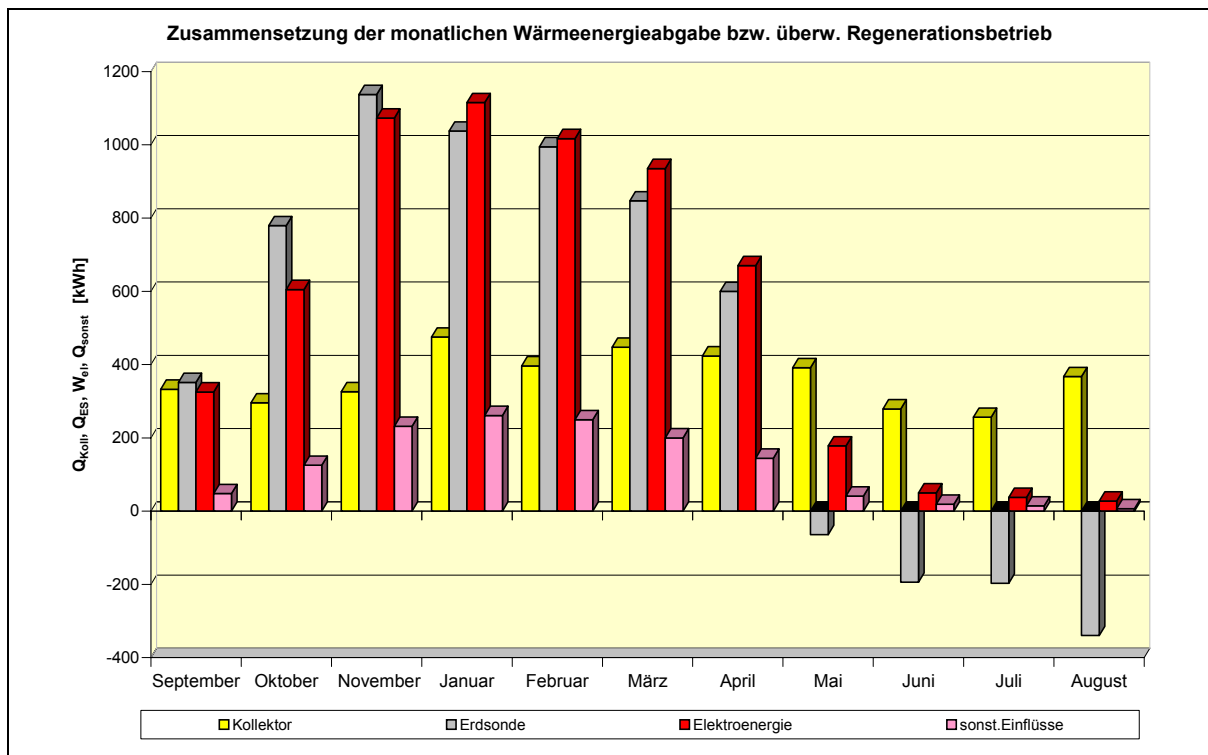


Diagramm 30 Zusammensetzung der Wärmeabgabe bzw. Regenerationsbetrieb

Unter den sonstigen Einflüssen sind die Wärmegewinne durch das Rohrleitungsnetz und die in Wärme ungewandelte Pumpenenergie zusammengefasst. Eine genauere Aufschlüsselung dazu ist Diagramm 30 zu entnehmen.

In Diagramm 30 fällt der relativ konstante Kollektorertrag über den kompletten Versuchszeitraum auf. Nach näherer Betrachtung der Daten wurde die Ursache für den hohen Ertrag in den Wintermonaten gefunden. Die hohe Anzahl WP-Betriebsstunden, wobei Fluidtemperaturen von $\vartheta_{Koll-RL} \geq -4^{\circ}C$ erreicht wurden, führte sehr häufig zur Kollektorbeteiligung, wenn eine Temperaturdifferenz $\vartheta_{AU} > \vartheta_{Koll-RL}$ bestand.

Tabelle 10 zeigt die Aufschlüsselung der Betriebsstunden der einzelnen Anlagenkomponenten.

Erdsonde [h]			Kollektor [h]	Verdichter [h]
kombinierter Heizbetrieb beider WQA $t_{WQA-komb.}$	Sondenregenerationsbetrieb t_{ES-reg}	exklusiver Heizbetrieb $t_{ES-Entl-exkl}$	Gesamtbetriebszeit $t_{Koll} = t_{WQA-komb} + t_{ES-reg}$	Gesamtbetriebszeit $t_{Verd.} = t_{WQA-komb} + t_{ES-Entl-exkl}$
3174	1021	58	4195	3232

Tabelle 10 Betriebsstunden gesamt

Es wird ersichtlich, dass nur selten eine Kollektorunterstützung aufgrund des Wetters nicht möglich war (nur $\frac{58h}{3232h} = 1,8\%$ des gesamten Verdichterbetriebs).

Bei mildem Klima stellen also QUICK STEP[®] Solarthermie- Module auch im Winter eine kontinuierliche WQA dar.

Die Aperturfläche des Kollektors am Versuchsstand betrug $6,6m^2$ bei einem Gesamtwärmebedarf des Gebäudes von $17,18MWh$ (siehe Tabelle 10). Das entspricht einer Auslegung der Kollektorfläche von:

$$A_{Koll-Dim} = \frac{A_{Koll}}{Q_{J-H}} = \frac{6,6m^2}{17,18MWh} = 0,38 \frac{m^2}{MWh}$$

Dieser Wert liegt weit unter den Auslegungsempfehlungen des UMSYS-Projekts ($A_{Koll-Dim} \approx 0,8$ bis $3,6m^2$). Trotz der zu gering dimensionierten Kollektorfläche ist ein deutlicher Ertragsanteil auch in den Wintermonaten erkennbar, nach Diagramm 31.

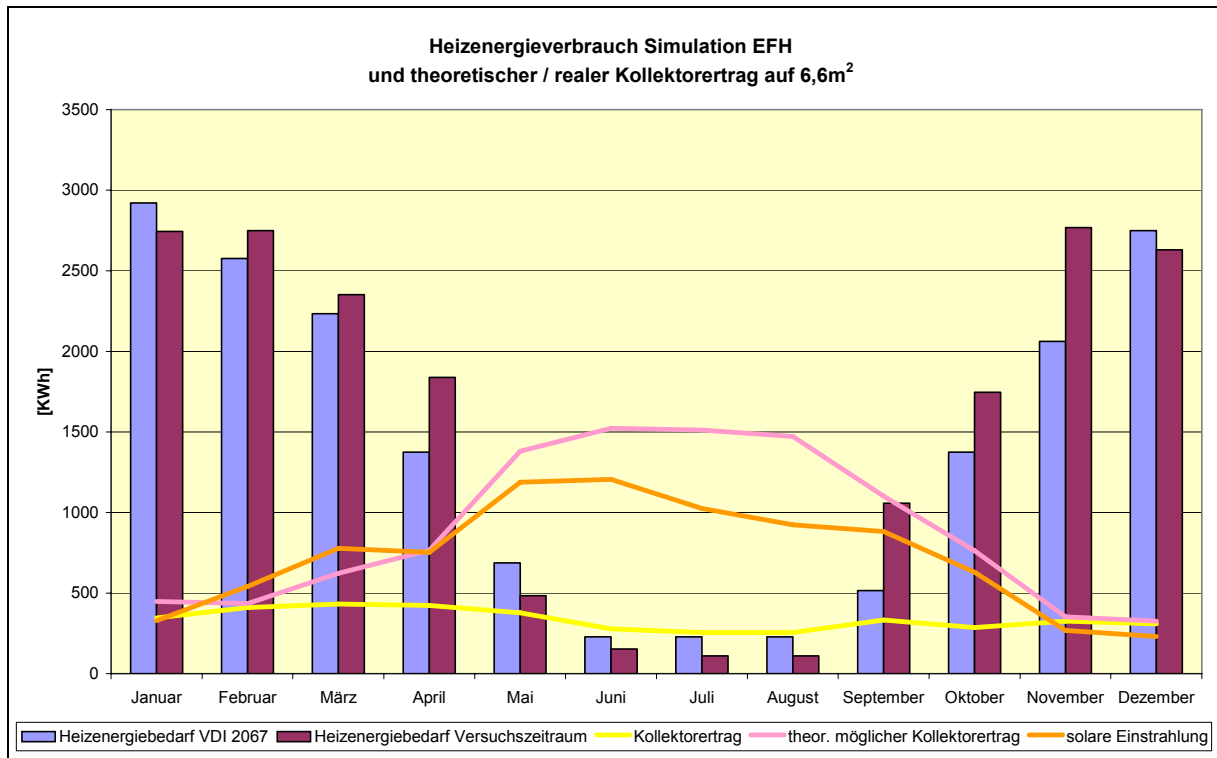


Diagramm 31 Entwicklung der Kollektordeckungsleistung über die Versuchsmonate

Erkennbar ist, dass der theoretisch erzielbare Kollektorertrag in den warmen Monaten über der solaren Einstrahlung liegt. Darin zeigt sich der Vorteil unverglaster Kollektorsysteme, mit denen es möglich ist, Wärmeenergie auch bei bewölktem Himmel und in den Nachtstunden der Umwelt zu entziehen.

Der tatsächlich erreichte Kollektorertrag weicht am Versuchsstand ab Mai stark vom prognostizierten Wert ab. Das liegt vor allem am fehlenden Heizwärmebedarf, bzw. der frühzeitigen, vollständigen Erdsondenregenerierung. Der Kollektorkreislauf wurde fast ausschließlich nur noch in den Mittagsstunden betrieben (Beladung) und kurzfristig zur Speichertemperierung (WP-Betrieb).

Bei ausreichend groß dimensionierten Erdsondenanlagen kann von einem deutlich längeren Regenerationsbetrieb und damit Kollektorertrag in den Sommermonaten ausgegangen werden.

Setzt man die Dimensionierungen beider WQA am Versuchsstand ins Verhältnis, so ergibt sich

$$n_{ES-Koll} = \frac{30m}{6,6m^2} = 4,54 \frac{m_{ES}}{m_{Koll}^2}$$

Das entspricht nach Diagramm 35 bei $7 \frac{m_{ES}}{MWh * a}$ den Auslegungsempfehlungen

UMSYS mit einer Kollektorfläche von

$$A_{Koll-Dim} \approx \frac{7 \frac{m_{ES}}{MWh * a}}{4,54 \frac{m_{ES}}{m_{Koll}^2}} \approx 1,6 \frac{m^2}{MWh * a}$$

Auf das praxisgerechte Verhältnis $n_{ES-Koll}$ am Versuchsstandort können, unter Anwendung der zur Verfügung stehenden Messwerte, die empfohlenen spezifischen Kollektorflächen angewandt werden. Das lässt eine Abschätzung des Erdsondenentzugs nach Diagramm 32 zu. Die Vergrößerung der Kollektorfläche ist verbunden mit einer Verringerung der spezifischen Kollektorleistung. Dem wurde in Diagramm 32 Rechnung getragen, indem von einer 50% -tigen Kollektorertragssteigerung bei Aperturflächenverdopplung [26] ausgegangen wurde.

Man erkennt, dass bereits eine geringe Kollektorfläche von $A_{Koll-Dim} \approx 0,8 \frac{m^2}{MWh * a}$ einen

erheblichen Beitrag zur Erdsondenentlastung leisten kann.

Dagegen bringt eine besonders groß ausgelegte Kollektorfläche keine ökonomisch sinnvolle Erhöhung der Kollektordeckung in den Wintermonaten, wie nachfolgend Diagramm 32 zeigt.

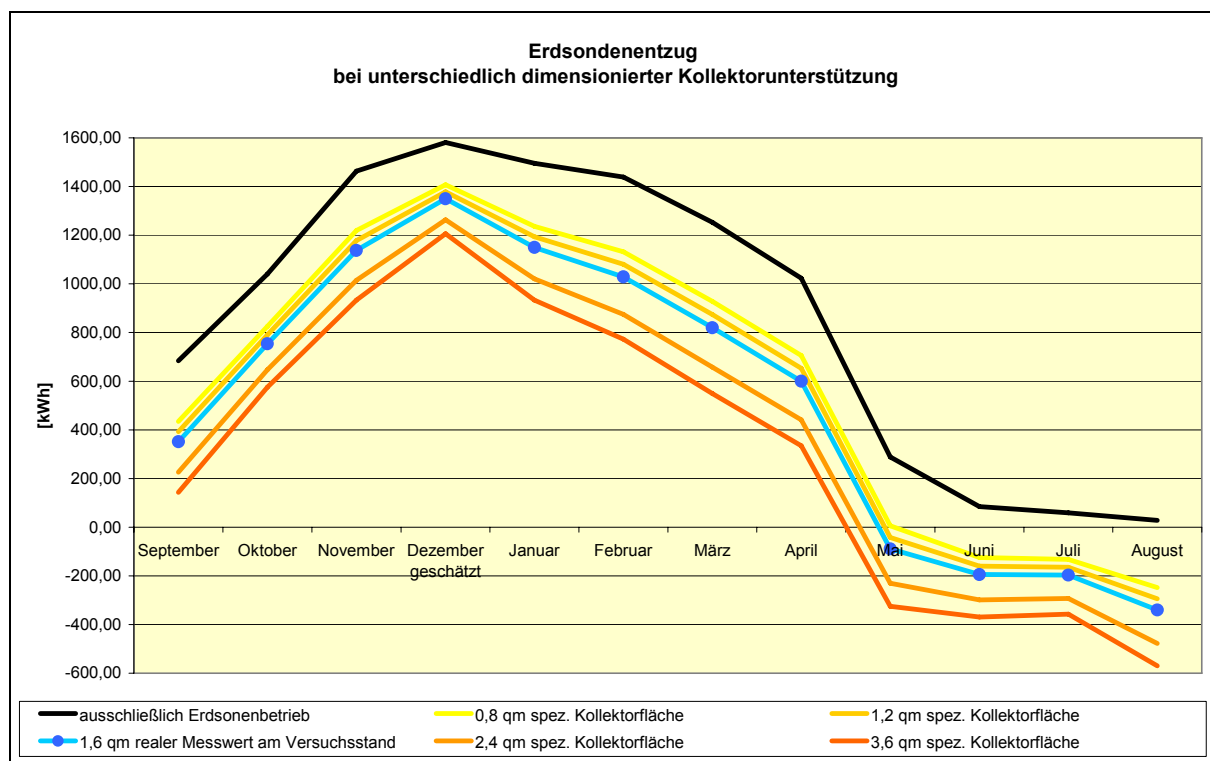


Diagramm 32 Erdsondenentzug, bei unterschiedlicher Kollektorauslegung

7.3 Gesamtenergiebilanz

Die (vereinfachte) Gesamtenergiebilanz zeigt, in welchem Verhältnis bei der Simulation des EFH der Aufwand von Primärenergie zur Nutzenergie steht.

Dazu wurden die Daten des gesamten Versuchszeitraums selektiert, aufbereitet und zusammengefasst. Wie Tabelle 11 zeigt, tritt dabei der hohe Anteil Elektroenergie für den Verdichter hervor. Ursache dafür ist in erster Linie das hohe Temperaturniveau auf der Verflüssigerseite und der geringe COP.

Energieaufwand gemessen vom 11.09.2007 bis 22.08.2008					
Wärmeenergieabgabe Q_{J-H} [kWh]	Kollektorertrag Q_{J-Koll} [kWh]		Erdsondenentzug Q_{J-ES} [kWh]	Elektroenergie WP W_{J-Verd} [kWh]	sonstige Einflüsse $Q_{sonst.}$ [kWh]
	Sondenregenerierung	Direktbetrieb			
17180	2380	1740	5377	6372	1308

Tabelle 11 Energieaufwand Versuchszeitraum

Sekundärseitig erfolgte also eine Wärmeabgabe von 17,18 MWh. Bezogen auf die Kompressoreinheit der WP ergibt sich damit über die gesamte Laufzeit ein durchschnittlicher

$$COP = \frac{Q_{J-H}}{W_J} = \frac{17180kWh}{6372kWh} = 2,7.$$

Die Werte für die JAZ bzw. β wurde vereinfachend mit geschätzten Werten für Regelung und Pumpen ermittelt.

Dafür wurden angesetzt:

$$W_{J-Koll-Pumpe} = P_{Koll-Pumpe} * t_{Koll} = 120W * 4195h = 503,4kWh$$

$$W_{J-ES-Pumpe} = P_{ES-Pumpe} * (t_{WQA-komb} + t_{ES-Entl-exkl}) = 50W * (3174h + 58h) = 161,6kWh$$

$$W_{J-HK-Pumpe} = P_{HK-Pumpe} * t_{Verd.} = 50W * 3232h = 161,6kWh$$

$$W_{J-Re gelung} = P_{Re gelung} * t_{Jahr} = 10W * 8760h = 87,6kWh$$

Daraus ergibt sich die Jahresarbeitszahl:

$$\beta = \frac{Q_{J-H}}{W_{J-Verd} + W_{J-Koll-Pumpe} + W_{J-ES-Pumpe} + W_{J-HK-Pumpe} + W_{J-Re gelung}} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{17180kWh}{6372kWh + 503,4kWh + 161,6kWh + 161,6kWh + 87,6kWh} \approx \frac{17180kWh}{7286kWh} \approx \underline{\underline{2,36}}$$

Die Ursachen für die niedrige Jahresarbeitszahl wurden bereits beschrieben. Diagramm 33 zeigt die Zusammensetzung des Heizwärmeaufkommens über den gesamten Versuchszeitraum.

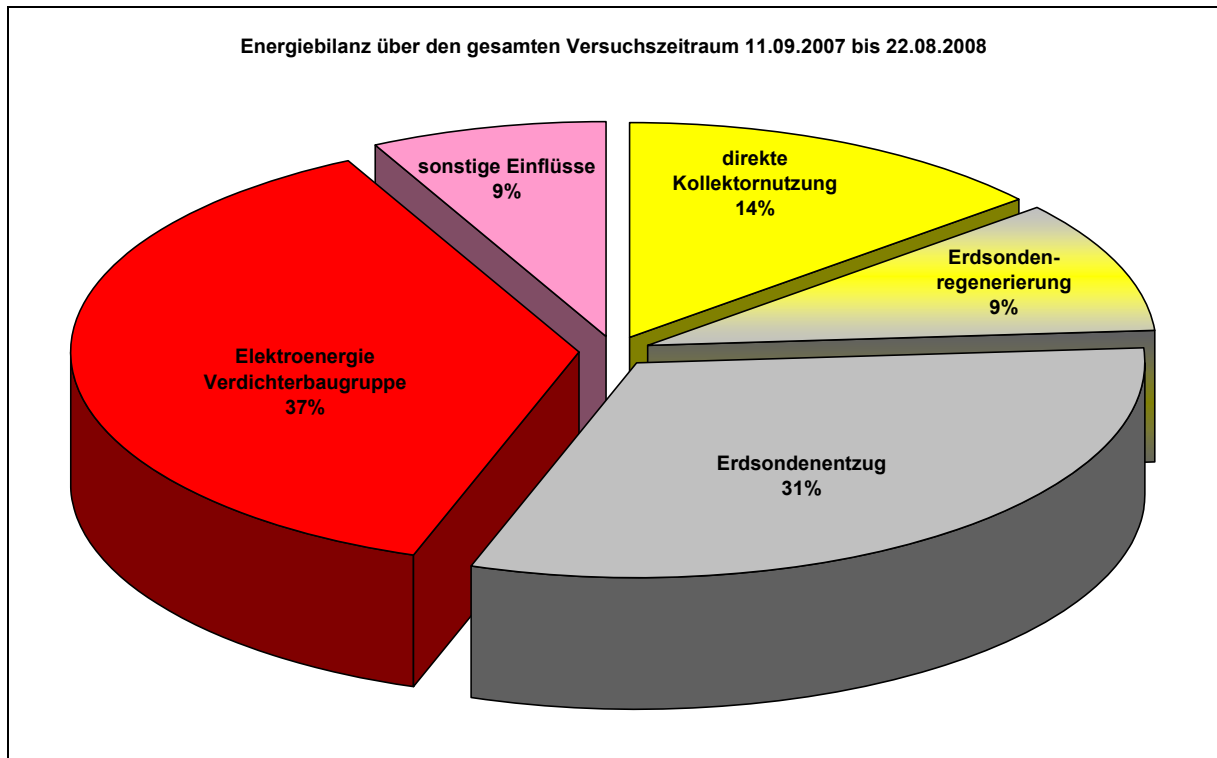


Diagramm 33 Energieanteile am Versuchsstandort

Der angegebene Elektroenergieverbrauch bezieht sich nur auf den Scroll-Verdichter und dessen Steuereinrichtung für die Drucküberwachung, ohne Pumpen, Stellantriebe und sonstige Regeleinrichtungen. Deren Energieverbrauch spiegelt sich mehrheitlich in den sonstigen Einflüssen wieder, der verbleibende Anteil wird als Schall- oder Wärmeenergie an die Umwelt abgegeben.

Für die Annahme, dass etwa 90% der Leistungsaufnahme der Umwälzpumpen als Wärme und kinetische Energie in das Fluid übertragen werden, so ergibt sich Diagramm 34.

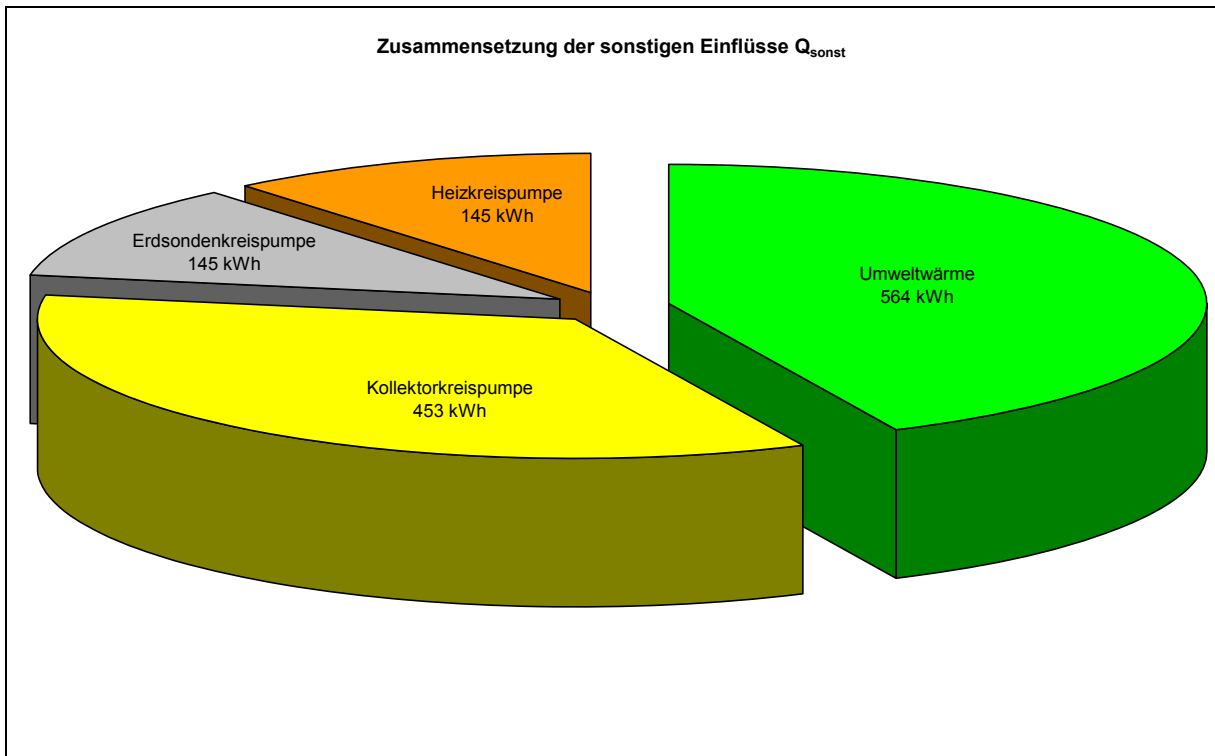


Diagramm 34 Aufgliederung der sonstige Einflüsse

Die zusätzlich aufgenommene Umweltwärme in Höhe von 564 kWh ist ein nicht zu unterschätzender Anteil am Gesamtenergieaufkommen.

Ursachen dafür sind:

- Aufnahme von Umgebungswärme über die Rohrleitungen zwischen Verdampfer-WT und Kollektorfeld
- Aufstellung der Wärmepumpe in einem Raum mit konstanter Temperatur von 20°C

8 Zusammenfassung und Ausblick

Erdgekoppelte Wärmepumpensysteme ermöglichen mit geringem fossilem Primärenergieaufwand eine zuverlässige Gebäudebeheizung. Während einer Heizperiode wird dabei dem Erdreich Wärmeenergie entzogen, das führt zu einer Abkühlung des Bodens. Konventionelle WP-Systeme haben oft Probleme, diesen Energieentzug in den Sommermonaten wieder vollständig durch Wärmetransfer aus der Umwelt auszugleichen. In der Regel führt die thermische Beanspruchung des Sondenbereichs langfristig zu einer Abnahme der Bodentemperatur (Diagramm 1). Das bedingt niedrigere

Sondenvorlauftemperaturen, ein Absinken der JAZ und steigenden Heizkosten aufgrund eines erhöhten Elektroenergieverbrauchs.

Durch den Einsatz von QUICKSTEP® Solarthermie kann bei richtiger Dimensionierung eine vollständige Regenerierung des Bodens außerhalb der Heizperiode erzielt werden (Kapitel 6.4). Das stabilisiert langfristig die Temperatur des Erdsondenbereichs und führt somit zu einem höheren Durchschnittstemperaturniveau quellenseitig am WP-System und damit letztlich zu einer Senkung der Energiekosten.

Metalldach-Kollektoren sind in der Lage, auch bei fehlender solarer Einstrahlung, effizient Umweltwärme aufzunehmen (Kapitel 5.1.2). In den Untersuchungen am Teststand wurde ein

spezifischer Jahresertrag von $Q_{J-spez.Koll} = 625 \frac{kWh}{m^2 * a}$ erzielt, bedingt durch den milden

Winter und die unterdimensionierte WP-Anlage und somit langen Laufzeiten bei niedrigen Fluidtemperaturen. Zur besseren Abschätzung wurde dazu eine Näherungsformel empirisch

ermittelt (Kapitel 5.1.1). In der Praxis kann von $Q_{J-spez.Koll} = 110 \text{ bis } 600 \frac{kWh}{m^2 * a}$

Kollektorjahresgewinn ausgegangen werden, abhängig von Kollektorbetriebszeit, Temperatur und Einstrahlung, siehe Tabelle 3 und Tabelle 4.

Das Metalldachkollektorensystem QUICKSTEP® Solarthermie kann auch in den Wintermonaten heizungsunterstützend betrieben werden (Diagramm 31). Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, die Erdsonde geringer zu dimensionieren und somit die Kosten für Erdbohrungen von 60,- EUR bis 80,- EUR/m_{ES} zu reduzieren. Das kompensiert die Mehrkosten der Solarthermie von ca. 125,- EUR zum überwiegenden Teil (Kapitel 0). Ein $Q_{J-ES} \geq 75\% Q_{J-WQA}$ sollte allerdings eingehalten werden, um eine temporäre thermische Überbeanspruchung des Erdreichs zu vermeiden (Kapitel 6.3).

Zur optimalen Ausnutzung des Kollektorangebots sollten beide WQA mittels stetiger Volumenstromregelung parallel zum Verdampfer-WT betrieben werden. Dabei ist auf eine optimale Sensorplatzierung und korrekte Einstellung der Reglerwerte zu achten (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Besonderes Augenmerk muss dabei auf die Dimensionierung und Auswahl der Umwälzpumpen gelegt werden. Die langen Jahresbetriebszeiten und geringen Pumpenwirkungsgrade führen zu einer geringen JAZ und hohen Betriebskosten. Empfehlenswert ist deshalb der Einsatz elektronisch geregelter Pumpen der Energieeffizienzklasse A (Kapitel 5.4).

Ausblick:

Erdwärmequellen und Solarthermie in Verbindung mit einer WP-Anlage ergänzen sich in optimaler Weise. Beide WQA weisen zeitlich versetzt ihre Maximalbeanspruchung bzw. Ertragsmaxima auf, wobei der Erdboden über ein gewisses Maß an Speichervermögen verfügt. Eine Verbindung beider erneuerbarer Energieträger ist deshalb sinnvoll, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Die Kombination von Wärmepumpe und Metalldachkollektor bietet sich auch als innovative und ästhetische Anlagenkomponente an. Ökologisch wie ökonomisch ist das multifunktionale Konzept (Gebäudehülle und Energiequelle) uneingeschränkt empfehlenswert.

Merseburg, d. 30.09.2008

9 Anhang

9.1 Symbol- und Indizesverzeichnis

Lateinische Buchstaben	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m ²
\dot{A}^*	absorbierte Wärmestrahlung	W
Ag	Absorptionsgrad	
b_v	Wärmeverlustkoeffizient	$\frac{W}{m^2 * K}$
c, c _p	spezifische Wärmekapazität	$\frac{J}{kg * K}$
d	Durchmesser	m
d	Tag	24h
E	Bestrahlungsdichte	$\frac{W}{m^2}$
\dot{E}^*	emittierte Wärmestrahlung	W
F_z	Zentripetalkraft	N
l	Länge	m
\dot{m}	Massestrom	kg/s
n	Anzahl oder Verhältnis	-
p	Druck	Pa
P	Leistung	W
Q	Wärme	J
\dot{Q}	Wärmestrom, Leistung	W
\dot{Q}^*	aufgenommener bzw. abgegebener Wärmestrom	W
R	Druckgefälle	Pa/m
r	Radius	m
Re	Reynoldszahl	-
Rg	Reflexionsgrad	
s	Weg. Strecke, Abstand	m
T	absolute Temperatur	K
Tg	Transmissionsgrad	-
t	Zeit	h
V	Volumen	m ³
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
w	Geschwindigkeit	m/s
W	elektrische Arbeit	kWh
$x_{Temp.}$	empirisch ermittelter Wärmeübergangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 * K}$
Griechische Buchstaben		
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 * K}$
β	Jahresarbeitszahl inkl. WQA-Pumpen	-
Δ	Differenz, Abstand	-

ε	Leistungszahl, siehe COP	-
η	Wirkungsgrad	-
η_{Konv}	Konversionsfaktor	
ϑ	Temperatur	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$
λ_{RR}	Rohrreibungskoeffizient	-
ζ	Druckverlustbeiwert	-
ν	kinematische Viskosität	$\frac{m^2}{s}$
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
φ	relative Luftfeuchtigkeit	%
Indizes		
AU	Außen	
Bel	Beladung, Regeneration	
Betr	Betrieb	
C	Carnot	
ES	Erdsonde	
exkl	exklusiv	
H	Heiz	
HL	Heizleistung	
HK	Heizkreis	
J	Jahr	
JAZ	Jahresarbeitszahl	
Koll	Kollektor	
kond	kondensativ	
konv	konvektiv	
korr	Korrektur	
m	Mittelwert	
O	Oberfläche	
prim	primär, Primärkreislauf	
Über	Übergang, Wärmeübergang	
V	Verlust	
Verdi	Verdichter	
VL	Vorlauf	
RL	Rücklauf	
soll	solar	
sonst.	sonstige Einflüsse	
spez.	spezifisch, bezogen auf m oder m ²	
Stur	Strahlung	
Abkürzungen		
COP	Coefficient Of Performance,	
JAZ	Jahresarbeitszahl	
WP	Wärmepumpe	
WQA	Wärmequellenanlage	
WT	Wärmetauscher	

9.2 Auslegungsempfehlungen des ISFH Hameln

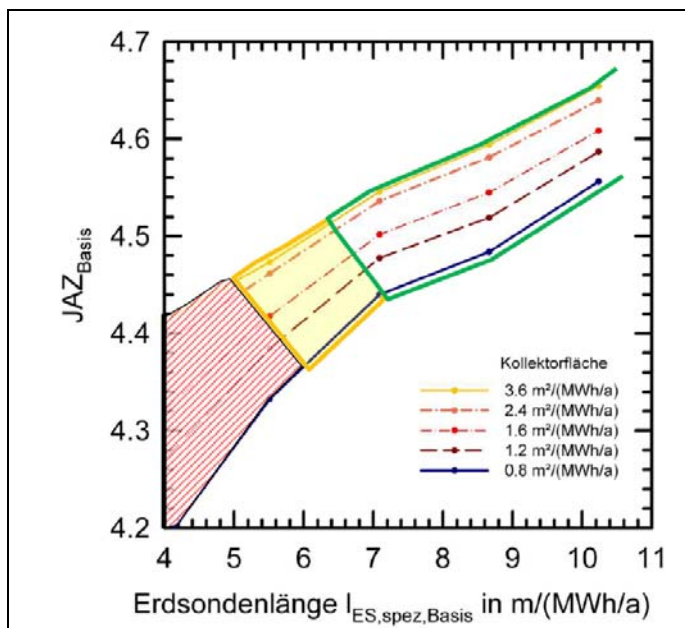


Diagramm 35 Auslegungsdiagramm des ISFH Hameln

Die Dimensionierungsempfehlungen des ISFH beziehen sich auf eine gewählte Basis-Jazz und eine festzulegende Erdsondenlänge und Kollektorfläche. Danach werden über verschiedene Korrekturfunktionen (z.B. Wetterstandort, Kollektorausrichtung, Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs, COP, Pumpenstromverbrauch, etc.) die tatsächlichen Werte ermittelt (Abbildung 6 Planungsablauf für die Auslegung).

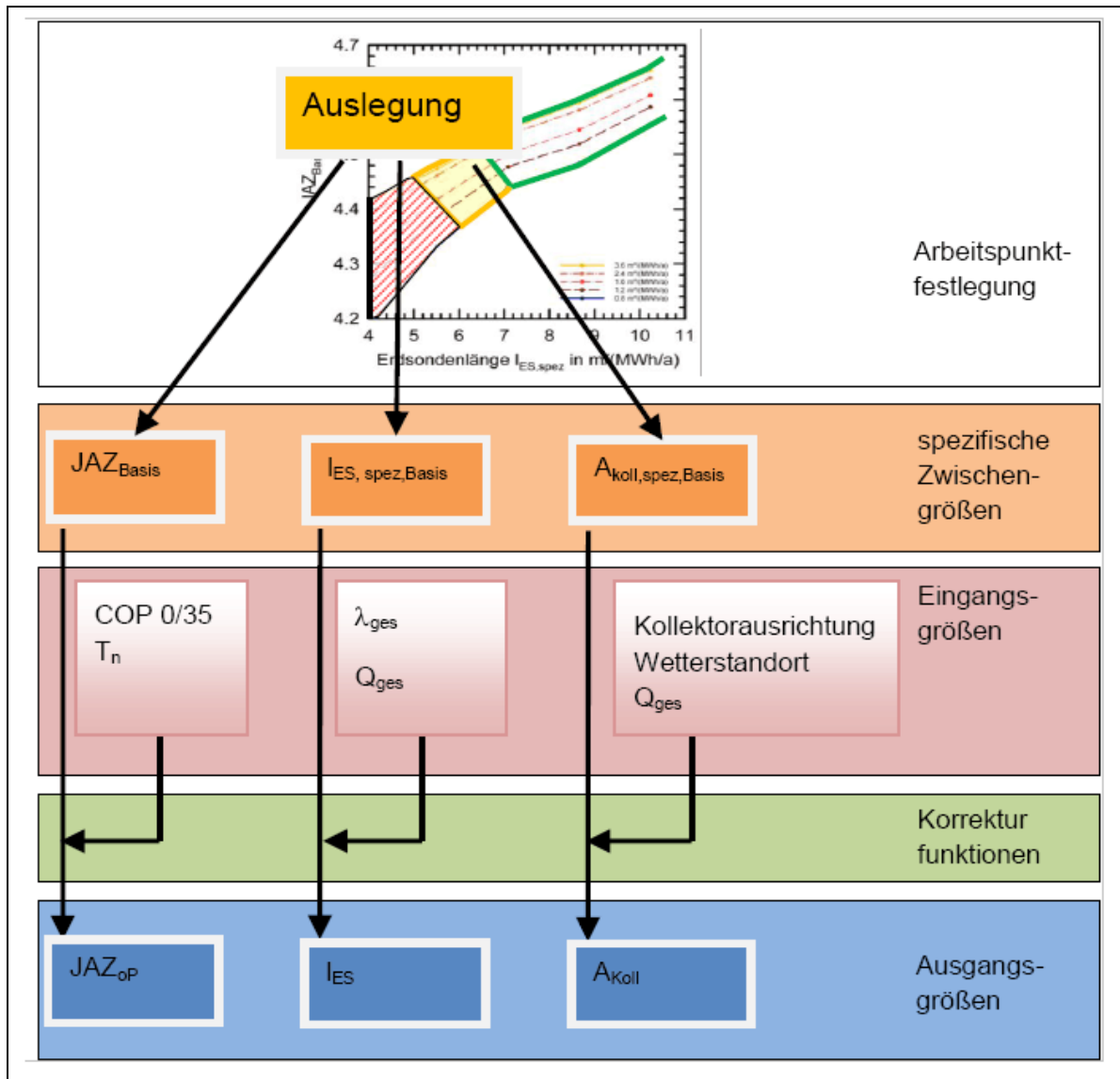


Abbildung 6 Planungsablauf für die Auslegung

Folgende Einschränkungen sind zu berücksichtigen:

Man beschränkt sich dabei auf Gebäude bis 35MWh Gesamtwärmebedarf und geht von einer spezifischen Kollektormindestfläche von $0,8m^2/MWh/a$ aus.

Für den Regenerationsbetrieb der Erdsonde die Hälfte der Entzugsstunden angesetzt und die Gesamtsondenlänge auf $4 \cdot 100m$ begrenzt. Für die Wärmeleitfähigkeit wird ein Wert von $\lambda = 2$ angesetzt und man nimmt Bezug auf einen Standard-COP von 4,6.

9.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Kollektoraufbau [4]	5
Abbildung 2 Systemlösung Reihenschaltung der WQA mit Umschaltventil.....	7
Abbildung 3 Systemlösung am Versuchsstand mit stetiger Volumenstromregelung.....	9
Abbildung 4 Einschaltbedingungen Solarkreis	30
Abbildung 5 Aufbauschema zur Druckverlustberechnung (Berechnungsgrundlage)	50
Abbildung 6 Planungsablauf für die Auslegung.....	77
Abbildung 6 Anlagenschema WP-Versuchsstand nach Umbau	82
Abbildung 7 Jahreseinstrahlung Deutschland [29].....	94

9.4 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1 Langzeit-Temperaturverlauf im Erdsondenbereich durch WP-Betrieb [10].....	3
Diagramm 2 COP in Abhängigkeit von der Sekundärtemperatur	13
Diagramm 3 Stellsignal in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz	15
Diagramm 4 suboptimale Erdsondenbeladung durch ungünstige Fühlerplatzierung	16
Diagramm 5 spez. Entzugsleistung nachts, windstill bis max. 2m/S	21
Diagramm 6 spez. Kollektorleistung nachts, Windgeschwindigkeiten über 2m/S.....	22
Diagramm 7 Mollier h,x-Diagramm [14].....	23
Diagramm 8 spez. Kollektorleistung nachts bei über 90% Luftfeuchtigkeit	24
Diagramm 9 Abschaltung der WP bei Erreichung des Pufferspeichersollwerts	25
Diagramm 10 Kollektorleistung am Tage	26
Diagramm 11 Kollektorleistung mit heraus gerechnetem Temperaturanteil	27
Diagramm 12 Korrekturfaktor zur Kollektorausrichtung [17] (Quelle ISFH)	28
Diagramm 13 spezifische Entzugsleistung nachts $\Delta T_{AU-Koll}$ bezogen.....	29
Diagramm 14 Vergleich Theorie – Praxis an einem Sonnentag	31
Diagramm 15 Vergleich bei wechselndem Wetter	32
Diagramm 16 Erdsondenbeladung unterbrochen von WP-Zyklen.....	40
Diagramm 17 Zusammenhang zwischen solarer Einstrahlung und Erdsondenregenerierung.....	41
Diagramm 18 Temperaturverlauf bei 100% Erdsondenleistung	42
Diagramm 19 sinkende Entzugsleistung durch Erdsondenabkühlung.....	44
Diagramm 20 Wirkungsgrad ECM und ACM bei Kleinpumpen [21].....	45
Diagramm 21 Druckverlust im Solarpaneel.....	46
Diagramm 22 wirtschaftliche Fließgeschwindigkeiten [38]	47
Diagramm 23 mechanische Pumpenleistung für unterschiedliche Rohrquerschnitte	48
Diagramm 24 Einfluss des Rohrquerschnitts auf die Pumpenleistung	49
Diagramm 25 Abhängigkeit der Kosten vom Volumenstrom und Kollektordimensionierung.....	51
Diagramm 26 JAZ – Minderung durch steigenden Pumpenenergiebedarf (Effizienzklasse D).....	52
Diagramm 27 JAZ bei Einsatz von Pumpen unterschiedlicher Energieeffizienzklasse	53
Diagramm 28 Einfluss unterschiedlicher Kollektorvolumenströme	55
Diagramm 29 Entwicklung der Erdsondentemperatur	62
Diagramm 30 Zusammensetzung der Wärmeabgabe bzw. Regenerationsbetrieb	64
Diagramm 31 Entwicklung der Kollektordeckung über die Versuchsmonate	66
Diagramm 32 Erdsondenentzug, bei unterschiedlicher Kollektorauslegung.....	68
Diagramm 33 Energieanteile am Versuchsstandort.....	70
Diagramm 34 Aufgliederung der sonstige Einflüsse	71
Diagramm 35 Auslegungsdiagramm des ISFH Hameln	76
Diagramm 35 Energieaufkommen September 2007	83
Diagramm 36 Energieaufkommen Oktober 2007.....	84
Diagramm 37 Energieaufkommen November 2007	85
Diagramm 38 Energieaufkommen Januar 2008.....	86
Diagramm 39 Energieaufkommen Februar 2008.....	87
Diagramm 40 Energieaufkommen März 2008.....	88
Diagramm 41 Energieaufkommen April 2008	89
Diagramm 42 Energieaufkommen Mai 2008.....	90
Diagramm 43 Ertragsdaten detailliert Mai 2008	90

Diagramm 44 Energieaufkommen Juni 2008	91
Diagramm 45 Energieaufkommen Juli 2008	92
Diagramm 46 Energieaufkommen August 2008	93

9.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Thermische Kennwerte der Solarmodule [4]	5
Tabelle 2 empirisch ermittelte $x_{Temp.}$ -Werte	24
Tabelle 3 minimaler spezifischer Kollektorjahresertrag	34
Tabelle 4 maximaler spezifischer Kollektorjahresertrag	34
Tabelle 5 Kollektorfläche und JAZ_{Basis} für Auslegungsbeispiel nach Diagramm 40 ..	51
Tabelle 6 unterschiedliche Volumenströme bei ähnlicher Witterung	54
Tabelle 7 Entzugsleistung und Entzugsenergie für Anlagen <20KW [24]	57
Tabelle 8 mittlere Gradtagzahlen nach VDI-Richtlinie 2067 GTZ20/15	58
Tabelle 9 Zusammenfassung der Wetterdaten	63
Tabelle 10 Betriebsstunden gesamt	65
Tabelle 11 Energieaufwand Versuchszeitraum	69
Tabelle 12 Ertragsdaten detailliert September 2007	83
Tabelle 13 Ertragsdaten detailliert Oktober 2007	84
Tabelle 14 Ertragsdaten detailliert November 2007	85
Tabelle 15 Ertragsdaten detailliert Januar 2008	86
Tabelle 16 Ertragsdaten detailliert Februar 2008	87
Tabelle 17 Ertragsdaten detailliert März 2008	88
Tabelle 18 Ertragsdaten detailliert April 2008	89
Tabelle 19 Ertragsdaten detailliert Juni 2008	91
Tabelle 20 Ertragsdaten detailliert Juli 2008	92
Tabelle 21 Ertragsdaten detailliert August 2008	93

9.6 Literatur und Quellenverzeichnis

- [1] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- [2] European Alliance of Companies for Energy Efficiency in Buildings www.euroace.org
- [3] Quelle VDEW-AK „Nutzenergiebilanzen“ 2000
- [4] RHEINZINK GmbH & Co. KG www.rheinzink.de
- [5] www.effiziento.de
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/Carnot-Kreisprozess>

- [7] <http://de.wikipedia.org/wiki/Waermpumpe>
- [8] Waermpumpenhersteller Alpha-Innotec GmbH, Kasendorf
- [9] http://www.uibk.ac.at/geographie/personal/geist/vo_grundlagen_der_fernerkundung
- [10] www.met-online.de
- [11] Angabe Waermpumpenhersteller Daikin www.daikin.de
- [12] <http://www.kimo.de/index.php?file=anwend/kostenfu/PRO-Kosten-FU.html&lang=DE>
- [13] FAWA Schlussbericht 2003
- [14] http://www.uni-due.de/imperia/md/content/ivg/td/lehre/gp_feuchte.pdf
- [15] http://www1.hs-bremerhaven.de/pt/VCD_2002/RAS/Regelungstechnik
- [16] Klimadaten deutscher Wetterstationen, Deutscher Wetterdienst Offenbach www.dwd.de
- [17] Auslegung_UMSys.pdf Institut für Sonnenenergieforschung GmbH Hameln, Juni 2008
- [18] 2Q_Konzept.pdf RHEINZINK© Solarthermie, Juni 2008
- [19] Auswertung-BV-Lucke-2004.doc
- [20] Energietechnische Gesellschaft im VDE Studie „Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland – Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarf“)
- [21] WILO SE Dortmund www.wilo.de
- [22] FAWA Schlussbericht 2004
- [23] EON Westfalen-Weser 2008
- [24] VDI 4640
- [25] <http://energy.caeds.eng.uml.edu/solbase.html>
- [26] www.aee-intec.at und www.solarenergy.ch)
- [27] 2008Tarifinformationen „Energy M privat“ Stromtarif der Stadtwerke Merseburg
http://www.stadtwerkemerseburg.de/uploads/media/Preisblatt_Energy_M_privat_ab_01.07.2008_01.pdf
- [28] <http://www.umweltlexikon-online.de/fp/archiv/>

- [29] www.terra-solar.eu
- [30] Eckhard Rebhan, Energiehandbuch Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie S.208 Springer- Verlag 2002 ISBN 354041259X
- [31] Heinz Herwig, Wärmeübertragung A-Z, S.366 ff. Springer- Verlag 2000 ISBN 3540668527
- [32] Herbert Windisch, Thermodynamik: Ein Lehrbuch für Ingenieure, Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2008, ISBN 3486582763
- [33] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt, 05.12.2007
- [34] Dipl.-Ing. Wilhelm Reiners, Fachverband für Energie-Marketing und Anwendung (HEA) e.V. beim VDEW, EOR-Tagung, 25.10.2007
http://www.eor.de/fileadmin/eor/docs/aktivitaeten/2007/energieberaterstag/Vortraege/03_Reiners.pdf
- [35] www.waterkotte.de
- [36] <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarkonstante>
- [37] DVGW Arbeitsblatt W 403

9.7 Weitere Grafiken, Diagramme und Tabellen

9.7.1 Anlagenschema

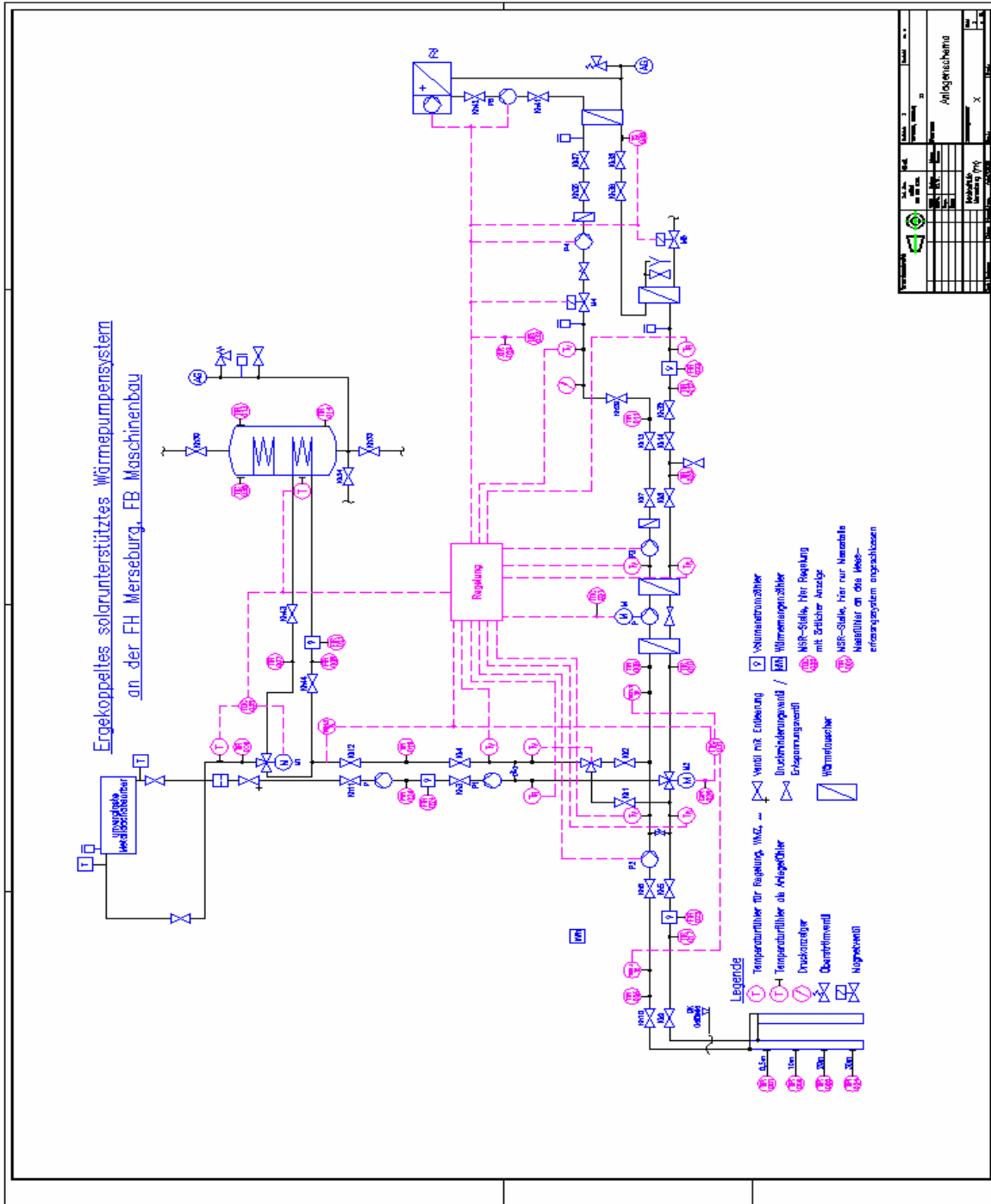


Abbildung 7 Anlagenschema WP-Versuchsstand nach Umbau

9.7.2 Energieanteile Tagesaufschlüsselung

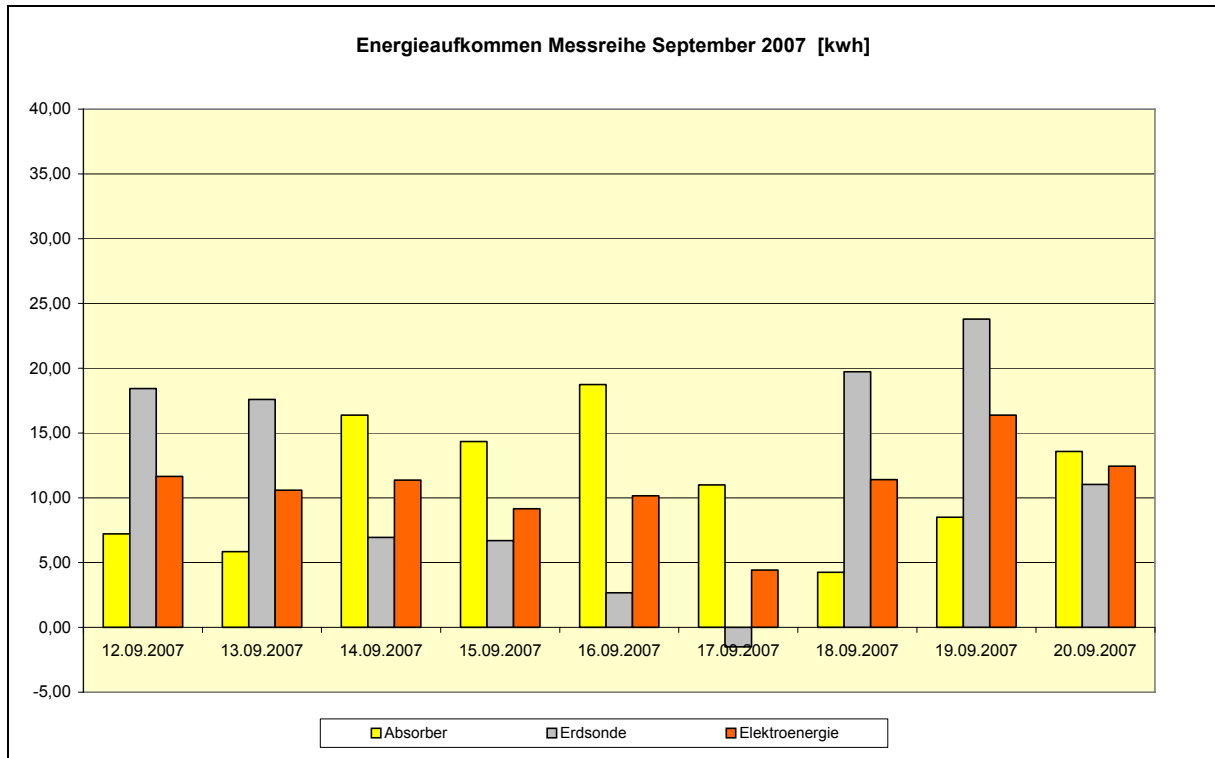


Diagramm 36 Energieaufkommen September 2007

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tages-durchschnitts-temperatur 24h [°C]	Tages-durchschnitts-einstrahlung 24h [W/m2]	Einstrahlung auf Aperturfläche 6,6m2 [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9ct/KWh]	Absorber-wirkungsgrad	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-entzug [KWh]	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-aufnahme [KWh]	COP		
12.09.2007	14.20	105,62	16,73	7,22	0,65 €	0,43	19%	18,43	48%	11,65	3,28	38,25	0,94
13.09.2007	13.21	130,65	20,70	5,84	0,53 €	0,28	17%	17,60	50%	10,59	3,30	34,90	0,86
14.09.2007	13.78	230,79	36,56	16,38	1,47 €	0,45	45%	6,94	19%	11,36	3,21	36,51	1,83
15.09.2007	14.01	272,39	43,15	14,35	1,29 €	0,33	46%	6,69	22%	9,16	3,39	31,08	0,88
16.09.2007	13.88	291,80	46,22	18,74	1,69 €	0,41	57%	2,67	8%	10,16	3,23	32,82	1,25
17.09.2007	17.97	198,14	31,39	10,99	0,99 €	0,35	73%	-1,51	-10%	4,42	3,39	14,99	1,09
18.09.2007	12.55	51,81	8,21	4,25	0,38 €	0,52	11%	19,72	53%	11,41	3,26	37,26	1,88
19.09.2007	9.70	172,94	27,39	8,50	0,77 €	0,31	16%	23,79	46%	16,38	3,16	51,77	3,10
20.09.2007	12.16	216,68	34,32	13,57	1,22 €	0,40	34%	11,04	28%	12,44	3,18	39,55	2,51
September 2007 gesamt (hochgerechnet)	13,50	185,65	882KWh	333KWh	29,96 €	0,38	31,49%	351KWh	33,23%	325KWh	3,27	1057KWh	48KWh

Tabelle 12 Ertragsdaten detailliert September 2007

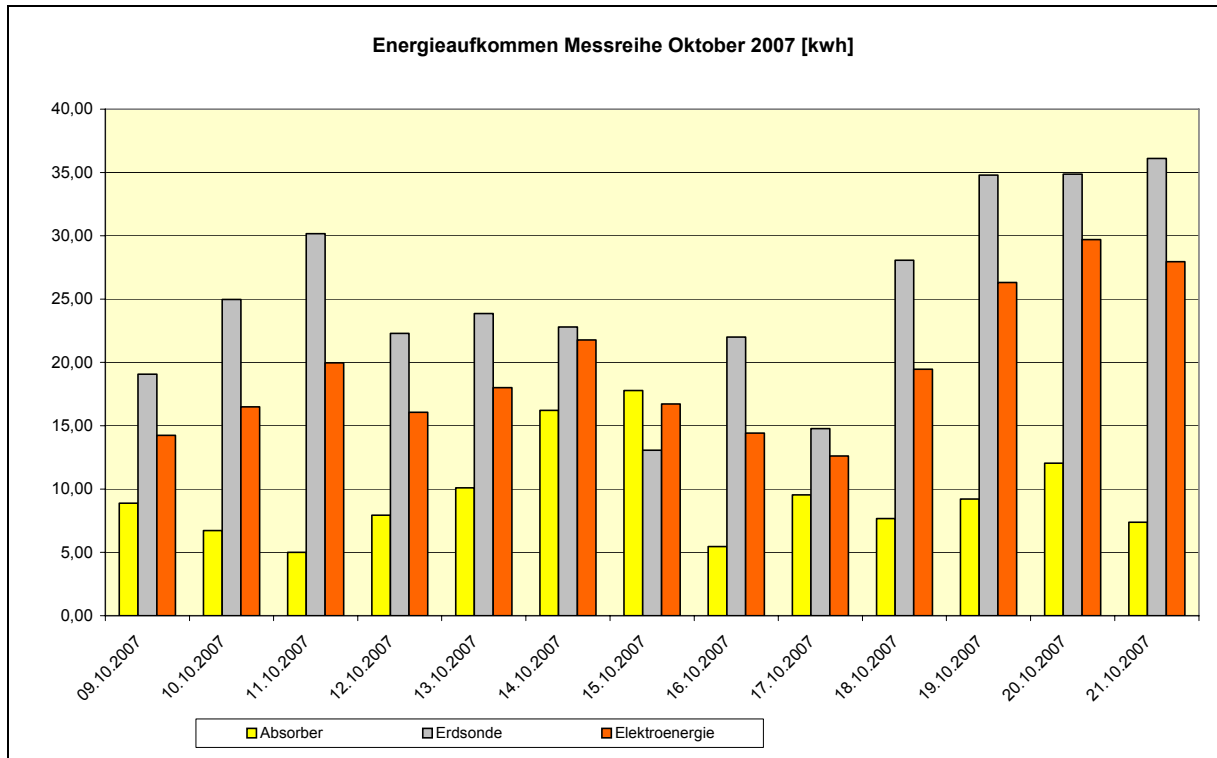


Diagramm 37 Energieaufkommen Oktober 2007

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tages-durchschnitts-temperatur 24h [°C]	Tages-durchschnitts-einstrahlung 24h [W/m²]	Einstrahlung auf Aperturfläche 6,6m² [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9ct/KWh]	Absorber-wirkungsgrad	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-entzug [KWh]	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-aufnahme [KWh]	COP		
09.10.2007	11,24	128,11	20,29	8,87	0,80 €	0,44	20%	19,06	42%	14,23	3,17	45,18	3,01
10.10.2007	9,74	124,12	19,66	6,73	0,61 €	0,34	13%	24,97	49%	16,48	3,12	51,48	3,29
11.10.2007	8,18	56,06	8,88	5,00	0,45 €	0,56	8%	30,18	51%	19,96	2,98	59,47	4,33
12.10.2007	11,53	60,01	9,51	7,92	0,71 €	0,83	16%	22,29	45%	16,06	3,11	49,91	3,64
13.10.2007	9,80	134,46	21,30	10,09	0,91 €	0,47	18%	23,86	43%	18,01	3,08	55,52	3,56
14.10.2007	7,27	253,57	40,17	16,22	1,46 €	0,40	25%	22,80	35%	21,77	2,96	64,44	3,65
15.10.2007	11,18	253,12	40,09	17,78	1,60 €	0,44	35%	13,07	26%	16,73	3,03	50,64	3,07
16.10.2007	11,62	101,15	16,02	5,46	0,49 €	0,34	12%	22,00	49%	14,41	3,13	45,07	3,19
17.10.2007	13,71	168,42	26,68	9,55	0,86 €	0,36	24%	14,78	37%	12,61	3,13	39,50	2,57
18.10.2007	8,78	92,11	14,59	7,67	0,69 €	0,53	13%	28,07	47%	19,46	3,04	59,26	4,05
19.10.2007	6,44	118,54	18,78	9,20	0,83 €	0,49	12%	34,80	46%	26,31	2,89	76,05	5,74
20.10.2007	5,30	175,84	27,85	12,03	1,08 €	0,43	15%	34,87	42%	29,69	2,78	82,63	6,03
21.10.2007	5,08	58,67	9,29	7,38	0,66 €	0,79	9%	36,11	46%	27,96	2,78	77,75	6,31
Oktober 2007 gesamt (hochgerechnet)	9,22	132,63	630KWh	286KWh	25,73 €	0,45	16,37%	754KWh	43,18%	585KWh	3,02	1747KWh	121KWh

Tabelle 13 Ertragsdaten detailliert Oktober 2007

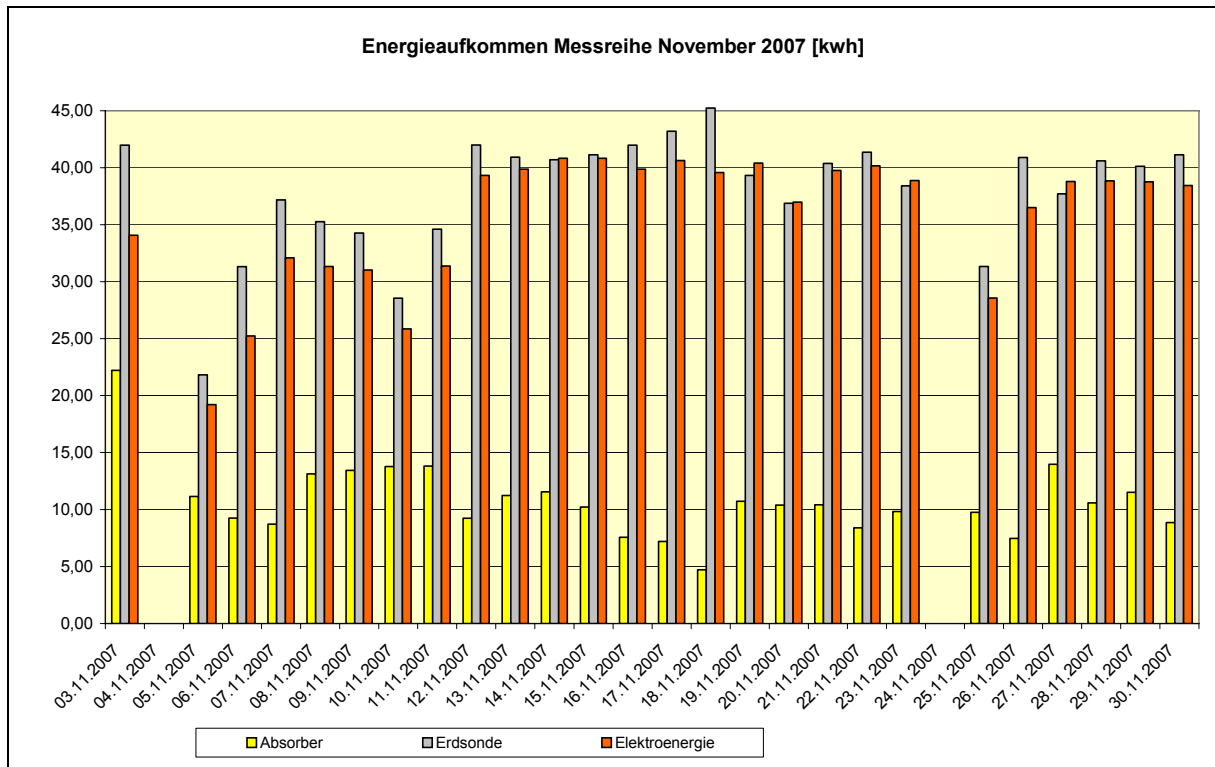


Diagramm 38 Energieaufkommen November 2007

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tagesdurchschnittstemperatur 24h [°C]	Tagesdurchschnittseinstrahlung 24h [W/m²]	Einstrahlung auf Aperturfläche 6,6m² [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9Ct/KWh]	Absorberwirkungsgrad	Anteil am Gesamternergieaufkommen	Energieertrag [KWh]	Anteil am Gesamternergieaufkommen	Energieaufnahme [KWh]	COP		
01.11.2007	10,14	23,36	3,70	22,21	2,00 €	6,00	22%	41,97	41%	34,08	3,02	103,02	4,76
03.11.2007	12,02	29,05	4,60	11,14	1,00 €	2,42	20%	21,83	39%	19,21	2,92	56,11	3,93
04.11.2007	8,44	48,08	7,62	9,26	0,83 €	1,22	13%	31,32	44%	25,24	2,81	70,98	5,16
05.11.2007	4,96	93,34	14,79	8,73	0,79 €	0,59	10%	37,17	44%	32,09	2,63	84,53	6,54
06.11.2007	6,36	82,94	13,14	13,13	1,18 €	1,00	15%	35,26	41%	31,33	2,75	86,14	6,42
07.11.2007	7,10	22,51	3,57	13,44	1,21 €	3,76	16%	34,27	40%	31,03	2,74	85,09	6,35
08.11.2007	9,15	59,26	9,39	13,77	1,24 €	1,47	19%	28,55	39%	25,84	2,84	73,44	5,28
09.11.2007	5,86	109,06	17,28	13,81	1,24 €	0,80	16%	34,61	40%	31,37	2,75	86,21	6,42
10.11.2007	3,31	30,79	4,88	9,24	0,83 €	1,89	9%	41,99	43%	39,33	2,51	98,61	8,05
11.11.2007	3,82	23,67	3,75	11,24	1,01 €	3,00	11%	40,93	41%	39,88	2,51	100,23	8,18
12.11.2007	3,75	41,53	6,58	11,55	1,04 €	1,76	11%	40,70	40%	40,81	2,48	101,41	8,35
13.11.2007	3,60	21,57	3,42	10,21	0,92 €	2,99	10%	41,14	41%	40,82	2,46	100,53	8,36
14.11.2007	1,26	20,69	3,28	7,57	0,68 €	2,31	8%	41,97	43%	39,87	2,45	97,58	8,17
15.11.2007	1,74	32,83	5,20	7,21	0,65 €	1,39	7%	43,21	43%	40,62	2,45	99,36	8,32
16.11.2007	0,87	23,57	3,73	4,71	0,42 €	1,26	5%	45,24	46%	39,57	2,47	97,63	8,11
17.11.2007	4,06	20,23	3,20	10,73	0,97 €	3,35	11%	39,33	40%	40,41	2,44	98,75	8,28
18.11.2007	4,26	23,36	3,70	10,39	0,94 €	2,81	11%	36,89	40%	36,97	2,48	91,83	7,58
19.11.2007	2,09	110,90	17,57	10,42	0,94 €	0,59	11%	40,38	41%	39,75	2,48	98,69	8,14
20.11.2007	2,27	74,10	11,74	8,41	0,76 €	0,72	9%	41,35	42%	40,16	2,44	98,15	8,23
21.11.2007	3,67	71,47	11,32	9,83	0,88 €	0,87	10%	38,41	40%	38,87	2,45	95,07	7,96
23.11.2007	6,30	16,66	2,64	9,76	0,88 €	3,70	13%	31,33	40%	28,57	2,72	77,76	8,10
24.11.2007	2,61	65,43	10,36	7,48	0,67 €	0,72	8%	40,89	44%	36,49	2,57	93,60	8,74
25.11.2007	3,71	73,59	11,66	13,97	1,26 €	1,20	14%	37,70	38%	38,78	2,58	99,90	9,45
26.11.2007	2,27	63,98	10,14	10,60	0,95 €	1,05	11%	40,60	41%	38,84	2,57	99,85	9,81
27.11.2007	1,67	142,52	22,58	11,51	1,04 €	0,51	12%	40,13	40%	38,75	2,57	99,56	9,17
28.11.2007	1,40	105,63	16,73	8,86	0,80 €	0,53	9%	41,13	42%	38,44	2,54	97,80	9,37
29.11.2007	2,08	106,85	16,93	11,23	1,01 €	0,66	11%	38,72	39%	38,74	2,54	98,21	9,52
30.11.2007	5,14	43,89	6,95	13,95	1,26 €	2,01	15%	34,55		35,76	2,62	93,67	9,41
November 2007 gesamt (hochgerechnet)	4,43	56,46	268KWh	326KWh	29,35 €	1,22	11,78%	1137KWh	41,09%	1073KWh	2,60	2768KWh	232KWh

Tabelle 14 Ertragsdaten detailliert November 2007

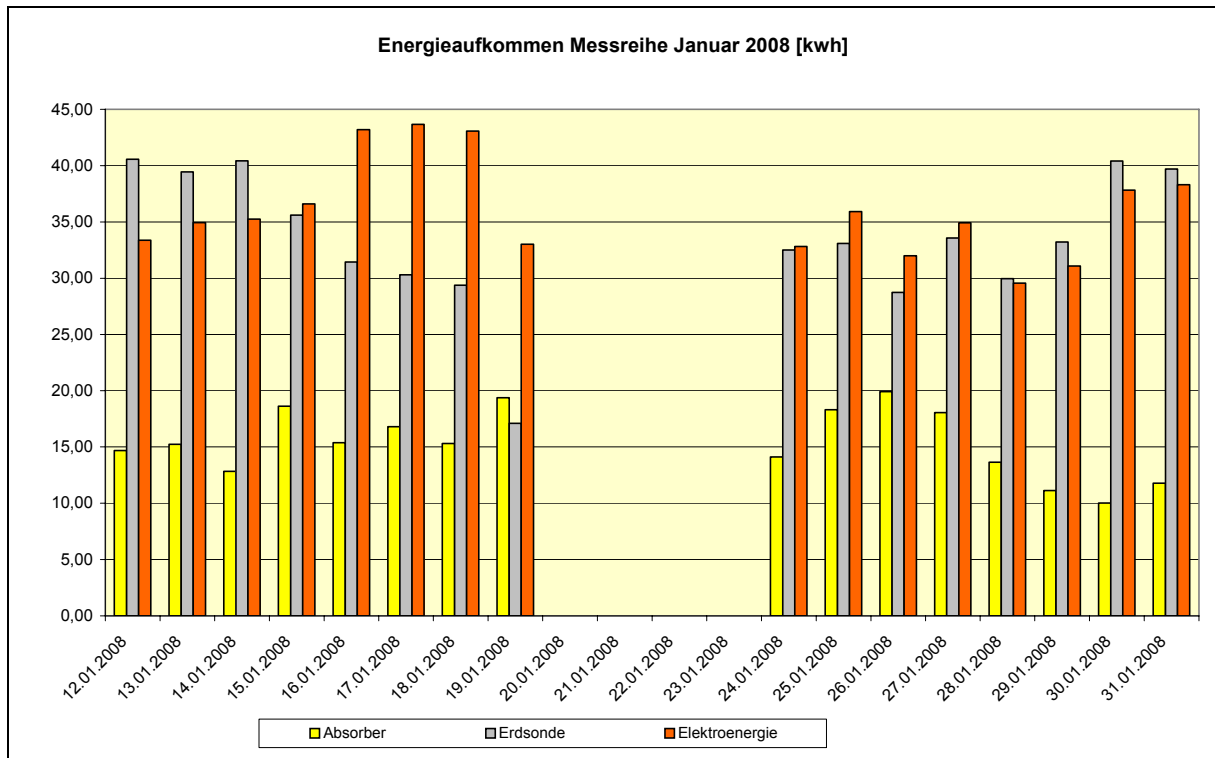


Diagramm 39 Energieaufkommen Januar 2008

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tagesdurchschnittstemperatur 24h [°C]	Tagesdurchschnittseinstrahlung 24h [W/m2]	Einstrahlung auf Aperturfläche 6,6m2 [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9Ct/KWh]	Absorberwirkungsgrad	Anteil am Gesamtenergieaufkommen	Energieentzug [KWh]	Anteil am Gesamtenergieaufkommen	Energieaufnahme [KWh]	COP		
05.01.2008	1,98	11,76	1,86	-4,13	0,37 €	-2,22	-5%	61,54	71%	26,76	3,22	86,22	2,05
06.01.2008	3,21	31,86	5,05	-3,93	0,35 €	-0,78	-5%	58,17	69%	27,18	3,12	84,67	3,25
07.01.2008	3,65	45,98	7,28	-3,56	0,32 €	-0,49	-4%	56,24	67%	27,30	3,07	83,88	3,90
08.01.2008	4,95	90,67	14,36	-3,11	0,28 €	-0,22	-4%	55,18	66%	27,91	3,01	83,91	3,93
12.01.2008	5,82	36,54	5,79	14,69	1,32 €	2,54	15%	40,57	41%	33,37	2,94	98,18	9,55
13.01.2008	3,10	166,81	26,42	15,23	1,37 €	0,58	15%	39,44	40%	34,94	2,83	98,88	9,27
14.01.2008	3,46	103,37	16,37	12,83	1,15 €	0,78	13%	40,43	41%	35,25	2,79	98,36	9,85
15.01.2008	6,24	107,60	17,04	18,62	1,68 €	1,09	19%	35,60	35%	36,60	2,74	100,42	9,60
16.01.2008	8,06	35,89	5,68	15,38	1,38 €	2,71	16%	31,44	32%	43,20	2,27	98,23	8,21
17.01.2008	6,15	122,58	19,42	16,80	1,51 €	0,87	17%	30,30	31%	43,67	2,25	98,18	7,41
18.01.2008	7,48	47,84	7,58	15,31	1,38 €	2,02	16%	29,37	31%	43,07	2,18	93,83	6,08
19.01.2008	11,77	28,55	4,52	19,39	1,75 €	4,29	25%	17,11	22%	33,02	2,35	77,53	8,01
24.01.2008	7,44	23,62	3,74	14,12	1,27 €	3,77	16%	32,51	37%	32,83	2,68	87,87	8,41
25.01.2008	5,28	181,78	28,79	18,32	1,65 €	0,64	19%	33,10	35%	35,93	2,67	95,82	8,47
26.01.2008	7,79	113,88	18,04	19,92	1,79 €	1,10	23%	28,73	32%	31,99	2,76	88,44	7,80
27.01.2008	7,19	12,12	1,92	18,05	1,62 €	9,40	19%	33,57	36%	34,93	2,70	94,38	7,84
28.01.2008	7,86	30,28	4,80	13,65	1,23 €	2,85	17%	29,96	37%	29,56	2,72	80,33	7,15
29.01.2008	6,63	56,61	8,97	11,13	1,00 €	1,24	13%	33,21	40%	31,08	2,68	83,43	8,00
30.01.2008	3,17	44,12	6,99	10,02	0,90 €	1,43	10%	40,40	41%	37,83	2,58	97,78	9,53
31.01.2008	2,92	96,22	15,24	11,79	1,06 €	0,77	12%	39,69	40%	38,31	2,59	99,36	9,57
Januar 2008 gesamt (hochgerechnet)	5,71	69,40	330KWh	346KWh	31,12 €	1,05	12,60%	1150KWh	41,90%	1027KWh	2,71	2745KWh	222KWh

Tabelle 15 Ertragsdaten detailliert Januar 2008

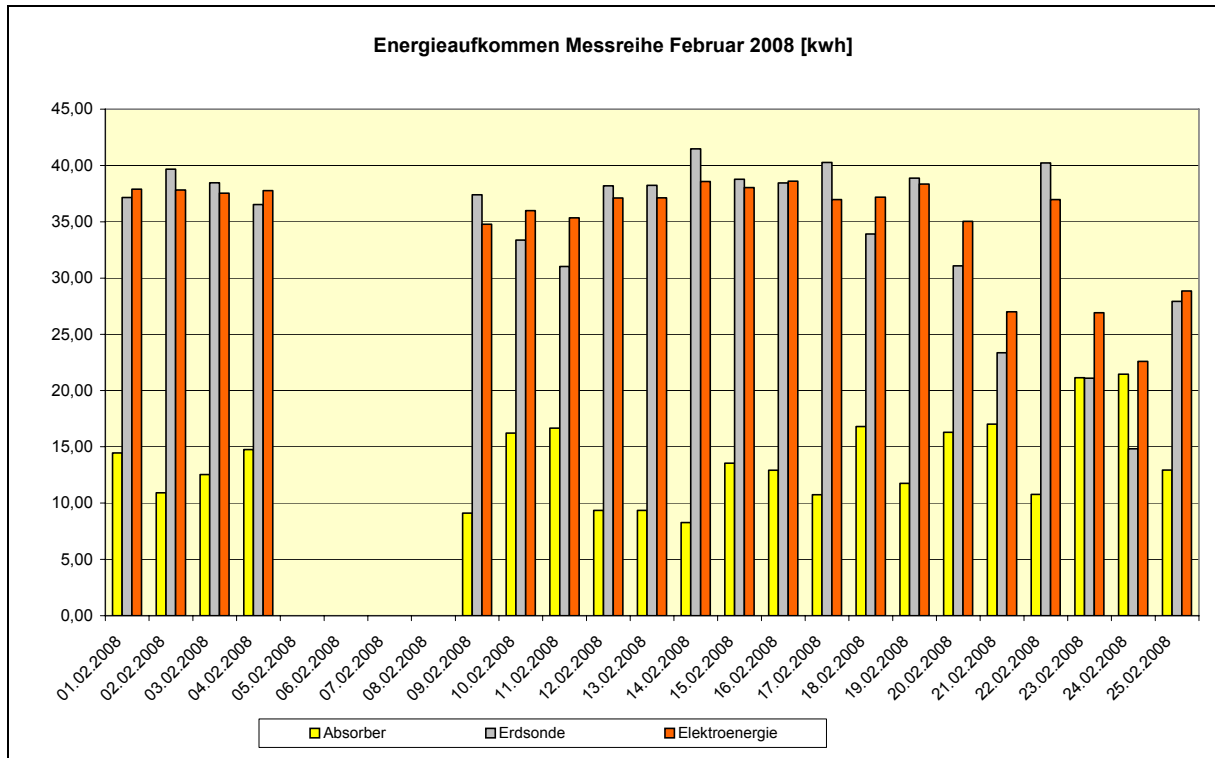


Diagramm 40 Energieaufkommen Februar 2008

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tages-durchschnitts-temperatur 24h [°C]	Tages-durchschnitts-einstrahlung 24h [W/m2]	Einstrahlung auf Aperturfäche 6,6m2 [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9ct/KWh]	Absorber-wirkungsgrad	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-entzug [KWh]	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-aufnahme [KWh]	COP		
01.02.2008	5,37	25,92	4,11	14,46	1,30 €	3,52	15%	37,15	37%	37,90	2,62	99,27	9,75
02.02.2008	3,23	64,23	10,17	10,91	0,98 €	1,07	11%	39,68	41%	37,83	2,59	97,94	9,52
03.02.2008	1,71	169,77	26,89	12,54	1,13 €	0,47	13%	38,47	39%	37,54	2,60	97,47	8,91
04.02.2008	3,66	149,92	23,75	14,75	1,33 €	0,62	15%	36,53	37%	37,77	2,60	98,22	9,17
09.02.2008	4,22	75,07	11,89	9,11	0,82 €	0,77	0,10	37,41	41%	34,78	2,60	90,33	9,04
10.02.2008	3,85	183,76	29,11	16,21	1,46 €	0,56	0,17	33,37	35%	35,99	2,62	94,29	8,72
11.02.2008	4,59	195,10	30,90	16,67	1,50 €	0,54	0,18	31,02	34%	35,36	2,59	91,46	8,41
12.02.2008	3,77	15,56	2,47	9,35	0,84 €	3,79	0,10	38,20	40%	37,11	2,54	94,34	9,69
13.02.2008	3,83	15,56	2,47	9,35	0,84 €	3,79	0,10	38,23	40%	37,13	2,54	94,41	9,70
14.02.2008	1,63	17,75	2,81	8,29	0,75 €	2,95	0,08	41,48	42%	38,57	2,55	98,33	9,98
15.02.2008	-2,59	218,61	34,63	13,55	1,22 €	0,39	0,14	38,77	39%	38,04	2,61	99,23	8,86
16.02.2008	0,22	168,81	26,74	12,91	1,16 €	0,48	0,13	38,45	39%	38,61	2,58	99,49	9,52
17.02.2008	1,96	140,18	22,20	10,74	0,97 €	0,48	0,11	40,26	42%	36,97	2,62	96,97	8,99
18.02.2008	3,60	150,01	23,76	16,80	1,51 €	0,71	0,17	33,92	35%	37,18	2,60	96,71	8,81
19.02.2008	1,62	78,80	12,48	11,75	1,06 €	0,94	0,12	38,88	39%	38,35	2,57	98,73	9,74
20.02.2008	6,43	69,18	10,96	16,29	1,47 €	1,49	0,18	31,07	34%	35,03	2,60	91,11	8,71
21.02.2008	9,94	22,52	3,57	17,02	1,53 €	4,77	0,23	23,35	32%	27,01	2,72	73,47	6,09
22.02.2008	-0,67	140,17	22,20	10,77	0,97 €	0,49	0,11	40,24	41%	36,97	2,62	96,97	8,99
23.02.2008	9,73	175,24	27,76	21,15	1,90 €	0,76	0,28	21,08	28%	26,91	2,79	75,03	5,89
24.02.2008	9,87	233,70	37,02	21,44	1,93 €	0,58	0,34	14,83	23%	22,58	2,83	63,97	5,12
25.02.2008	7,62	86,12	13,64	12,94	1,16 €	0,95	0,17	27,94	36%	28,85	2,66	76,68	6,95
Februar 2008 gesamt (hochgerechnet)	3,98	114,09	542KWh	410KWh	36,90 €	0,76	14,91%	1029KWh	37,43%	1052KWh	2,62	2749KWh	258KWh

Tabelle 16 Ertragsdaten detailliert Februar 2008

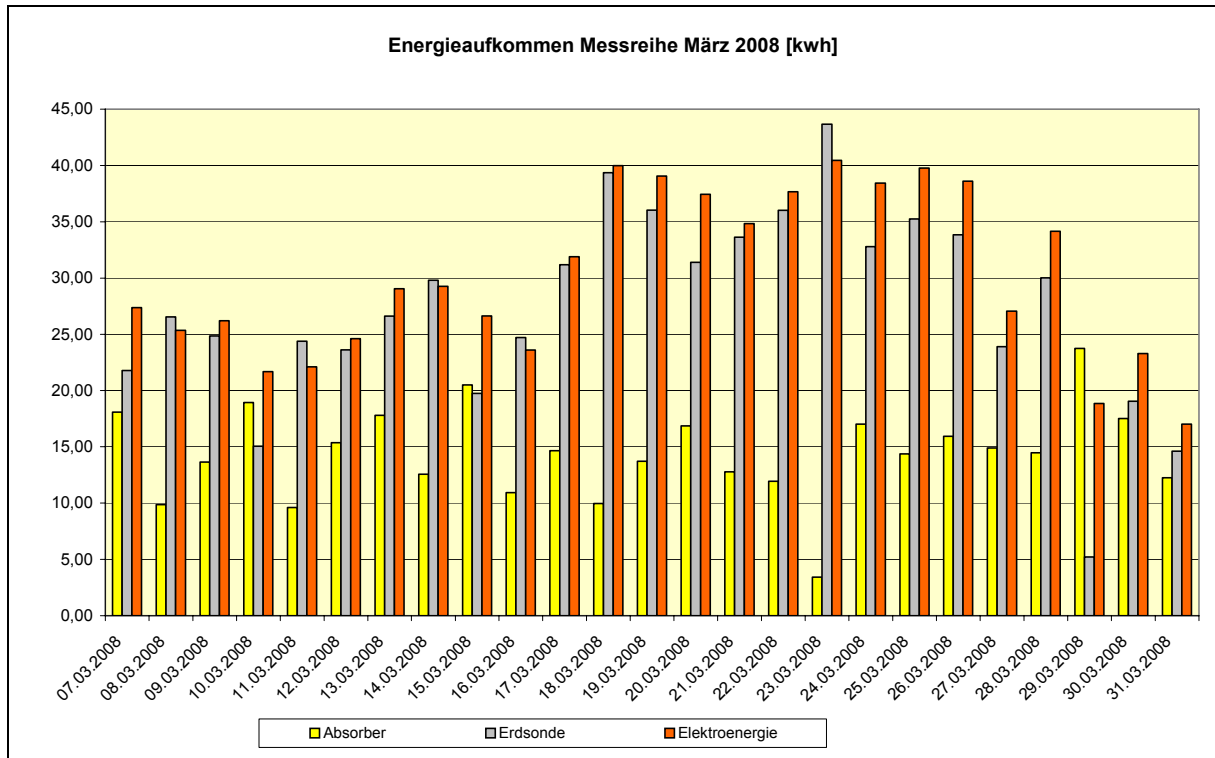


Diagramm 41 Energieaufkommen März 2008

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energie-abgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tages-durchschnitts-temperatur 24h [°C]	Tages-durchschnitts-einstrahlung 24h [W/m²]	Einstrahlung auf Aperturfäche 6,6m² [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9Ct/KWh]	Absorber-wirkungsgrad	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-entzug [KWh]	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-aufnahme [KWh]	COP		
07.03.2008	7,71	156,23	24,75	18,08	1,63 €	0,73	25%	21,78	30%	27,38	2,68	73,48	6,24
08.03.2008	6,92	61,22	9,70	9,86	0,89 €	1,02	15%	26,53	39%	25,35	2,68	67,81	6,07
09.03.2008	7,19	184,41	29,21	13,66	1,23 €	0,47	19%	24,84	35%	26,20	2,71	70,95	6,25
10.03.2008	10,12	215,14	34,08	18,94	1,70 €	0,56	32%	15,06	25%	21,68	2,77	59,96	4,29
11.03.2008	8,67	86,60	13,72	9,61	0,86 €	0,70	16%	24,40	40%	22,11	2,76	61,08	4,97
12.03.2008	8,72	146,96	23,28	15,36	1,38 €	0,66	23%	23,61	35%	24,61	2,77	68,18	4,60
13.03.2008	6,96	194,69	30,84	17,81	1,60 €	0,58	22%	26,61	33%	29,06	2,74	79,59	6,12
14.03.2008	6,54	108,52	17,19	12,56	1,13 €	0,73	16%	29,80	38%	29,27	2,67	78,29	6,66
15.03.2008	7,08	256,93	40,70	20,51	1,85 €	0,50	28%	19,75	27%	26,63	2,71	72,26	5,38
16.03.2008	8,49	71,43	11,32	10,93	0,98 €	0,97	17%	24,71	38%	23,60	2,73	64,50	5,27
17.03.2008	4,55	142,30	22,54	14,65	1,32 €	0,65	17%	31,18	37%	31,89	2,65	84,41	6,69
18.03.2008	1,38	109,68	17,37	9,96	0,90 €	0,57	10%	39,36	40%	39,99	2,43	97,29	7,98
19.03.2008	2,39	174,41	27,63	13,72	1,23 €	0,50	14%	36,03	37%	39,05	2,48	96,81	8,01
20.03.2008	2,76	206,50	32,71	16,85	1,52 €	0,52	18%	31,41	34%	37,43	2,48	92,72	7,03
21.03.2008	4,02	93,17	14,76	12,77	1,15 €	0,87	14%	33,63	38%	34,83	2,56	89,24	8,01
22.03.2008	2,84	85,23	13,50	11,95	1,08 €	0,89	13%	36,01	38%	37,67	2,49	93,92	8,29
23.03.2008	-0,78	91,67	14,52	3,42	0,31 €	0,24	4%	43,66	45%	40,46	2,39	96,68	9,13
24.03.2008	0,49	295,72	46,84	17,01	1,53 €	0,36	18%	32,79	34%	38,44	2,50	95,98	7,74
25.03.2008	1,32	179,39	28,41	14,36	1,29 €	0,51	15%	35,25	36%	39,77	2,45	97,27	7,88
26.03.2008	2,42	176,59	27,97	15,92	1,43 €	0,57	17%	33,84	35%	38,61	2,49	96,10	7,73
27.03.2008	7,37	193,93	30,72	14,89	1,34 €	0,48	21%	23,90	33%	27,05	2,66	71,89	6,04
28.03.2008	3,96	177,53	28,12	14,47	1,30 €	0,51	17%	30,01	35%	34,16	2,53	86,28	7,64
29.03.2008	11,62	299,85	47,50	23,75	2,14 €	0,50	46%	5,22	10%	18,85	2,76	52,05	4,23
30.03.2008	8,77	223,70	35,43	17,52	1,58 €	0,49	27%	19,05	29%	23,28	2,79	64,86	5,00
31.03.2008	10,79	159,38	25,25	12,25	1,10 €	0,49	26%	14,62	30%	17,02	2,82	47,98	4,10
März 2008 gesamt (hochgerechnet)	5,69	163,65	778KWh	433KWh	38,97 €	0,56	18,41%	820KWh	34,86%	905KWh	2,63	2351KWh	194KWh

Tabelle 17 Ertragsdaten detailliert März 2008

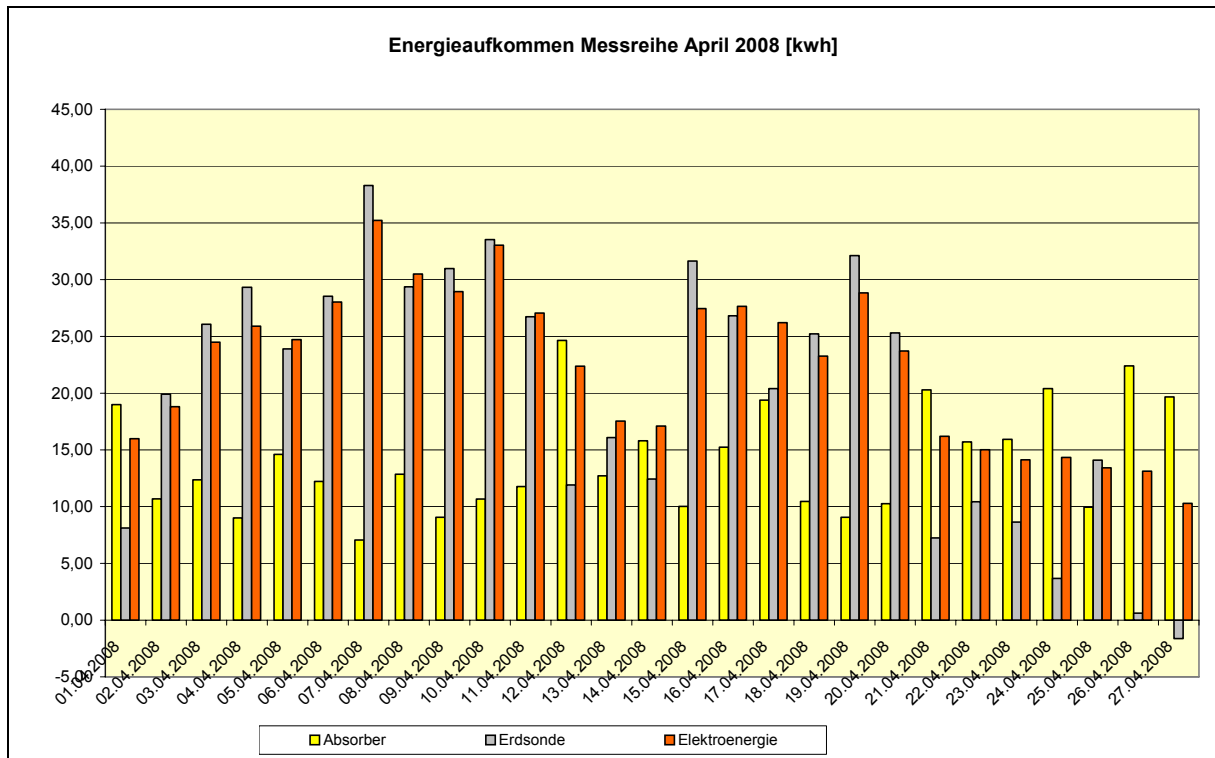


Diagramm 42 Energieaufkommen April 2008

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tages-durchschnitts-temperatur 24h [°C]	Tages-durchschnitts-einstrahlung 24h [W/m ²]	Einstrahlung auf Aperturfäche 6,6m ² [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9Ci/KWh]	Absorber-wirkungsgrad	Anteil am Gesamt-energieaufkommen	Energie-entzug [KWh]	Anteil am Gesamt-energieaufkommen	Energie-aufnahme [KWh]	COP		
01.04.2008	11,94	229,99	36,43	18,99	1,71	0,52	41,04%	8,11	0,18	15,99	2,89	46,26	3,18
02.04.2008	8,63	131,25	20,79	10,70	0,96	0,51	20,07%	19,89	0,37	18,81	2,83	53,31	3,91
03.04.2008	7,14	110,73	17,54	12,36	1,11	0,70	18,22%	26,06	0,38	24,48	2,77	67,84	4,94
04.04.2008	6,60	67,40	10,68	9,01	0,81	0,84	12,88%	29,32	0,42	25,90	2,70	69,95	5,71
05.04.2008	7,63	157,41	24,93	14,61	1,31	0,59	21,25%	23,90	0,35	24,72	2,78	68,75	5,52
06.04.2008	5,12	126,84	20,09	12,22	1,10	0,61	16,33%	28,53	0,38	28,02	2,67	74,81	6,03
07.04.2008	2,50	44,97	7,12	7,05	0,63	0,99	7,96%	38,29	0,43	35,22	2,51	88,57	8,01
08.04.2008	5,19	126,49	20,04	12,86	1,16	0,64	16,17%	29,36	0,37	30,50	2,61	79,57	6,85
09.04.2008	5,08	46,34	7,34	9,07	0,82	1,24	11,93%	30,96	0,41	28,94	2,63	75,96	7,00
10.04.2008	4,51	42,02	6,66	10,67	0,96	1,60	12,54%	33,54	0,39	33,04	2,57	85,03	7,79
11.04.2008	6,73	69,58	11,02	11,77	1,06	1,07	16,35%	26,74	0,37	27,04	2,66	71,97	6,42
12.04.2008	9,06	306,97	48,62	24,65	2,22	0,51	38,79%	11,91	0,19	22,37	2,84	63,54	4,61
13.04.2008	10,49	179,64	28,46	12,72	1,14	0,45	25,42%	16,10	0,32	17,53	2,85	50,02	3,67
14.04.2008	10,02	185,46	29,38	15,81	1,42	0,54	32,44%	12,43	0,26	17,09	2,85	48,75	3,41
15.04.2008	6,68	49,02	7,77	10,02	0,90	1,29	13,32%	31,65	0,42	27,46	2,74	75,24	6,11
16.04.2008	6,43	157,39	24,93	15,25	1,37	0,61	20,19%	26,81	0,35	27,65	2,73	75,54	5,82
17.04.2008	5,47	276,07	43,73	19,40	1,75	0,44	27,33%	20,40	0,29	26,20	2,71	70,98	4,98
18.04.2008	7,35	126,44	20,34	10,46	0,94	0,51	16,31%	25,21	0,39	23,26	2,76	64,14	5,20
19.04.2008	6,24	37,64	5,96	9,07	0,82	1,52	11,93%	32,11	0,42	28,84	2,64	76,00	5,99
20.04.2008	8,56	83,75	13,27	10,27	0,92	0,77	15,85%	25,31	0,39	23,72	2,73	64,76	5,47
21.04.2008	11,78	249,73	39,56	20,30	1,83	0,51	43,17%	7,25	0,15	16,20	2,90	47,02	3,27
22.04.2008	12,25	181,67	28,78	15,70	1,41	0,55	35,53%	10,42	0,24	15,02	2,94	44,20	3,05
23.04.2008	11,09	250,19	39,63	15,93	1,43	0,40	38,53%	8,65	0,21	14,14	2,92	41,33	2,62
24.04.2008	12,50	288,31	45,67	20,39	1,83	0,45	48,76%	3,68	0,09	14,34	2,92	41,81	3,40
25.04.2008	11,07	147,85	23,42	9,95	0,90	0,42	24,77%	14,09	0,35	13,43	2,99	40,16	2,69
26.04.2008	12,31	302,59	47,93	22,41	2,02	0,47	58,29%	0,61	0,02	13,12	2,93	38,46	2,31
27.04.2008	14,48	302,72	47,95	19,67	1,77	0,41	64,69%	-1,64	-0,05	10,28	2,96	30,41	2,09
April 2008 gesamt (hochgerechnet)	8,40	158,54	753,36	423,65	38,13	0,56	23,05%	599,68	0,33	670,36	2,78	1838,21	144,52

Tabelle 18 Ertragsdaten detailliert April 2008

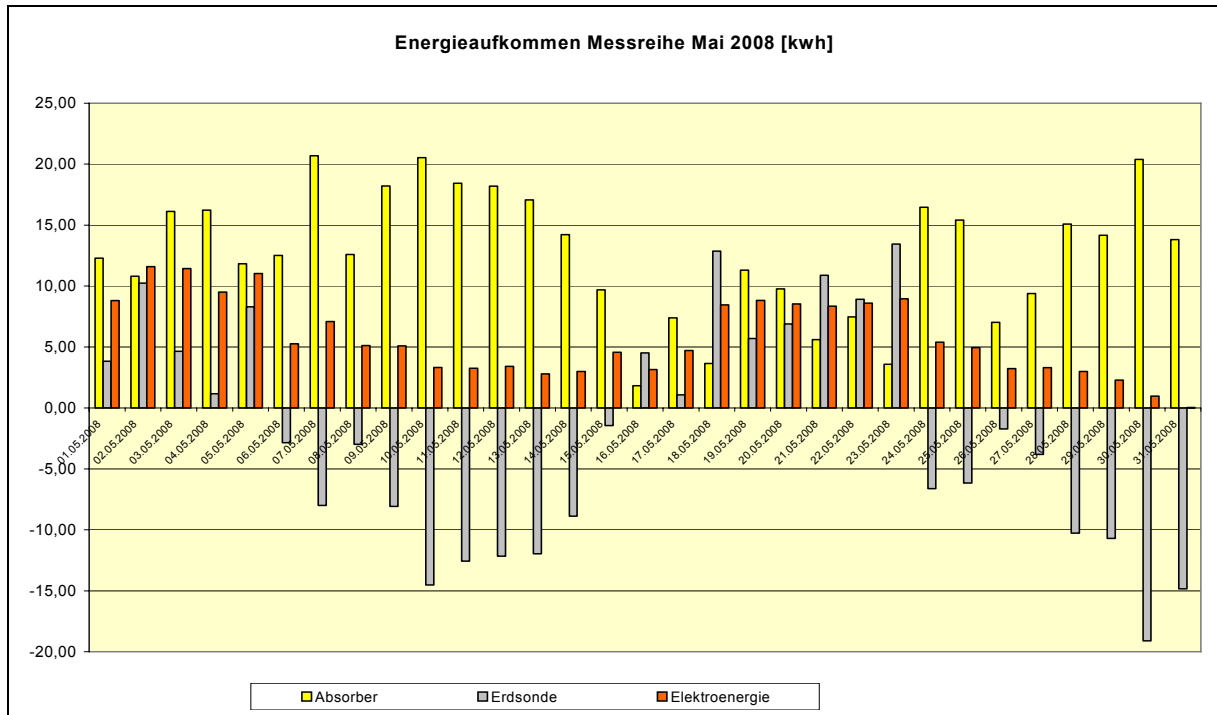


Diagramm 43 Energieaufkommen Mai 2008

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tages-durchschnitts-temperatur 24h [°C]	Tages-durchschnitts-einstrahlung 24h [W/m²]	Einstrahlung auf Aperturfläche 6,6m² [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [€/KWh]	Absorber-wirkungsgrad	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-entzug [KWh]	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-aufnahme [KWh]	COP		
01.05.2008	13,15	279,21	44,23	12,28	1,11 €	0,28	46%	3,83	14%	8,82	3,03	26,73	1,80
02.05.2008	10,86	185,37	29,36	10,81	0,97 €	0,37	31%	10,23	30%	11,59	2,97	34,42	1,79
03.05.2008	11,50	265,82	42,11	16,12	1,45 €	0,38	47%	4,65	14%	11,43	2,99	34,24	2,03
04.05.2008	12,42	305,17	48,34	16,23	1,46 €	0,34	57%	1,17	4%	9,50	3,00	28,46	1,55
05.05.2008	13,28	157,50	24,95	11,83	1,06 €	0,47	35%	8,31	25%	11,02	3,04	33,51	2,36
06.05.2008	15,42	308,41	48,85	12,50	1,13 €	0,26	77%	-2,85	-17%	5,26	3,10	16,32	1,40
07.05.2008	15,46	320,62	50,79	20,69	1,86 €	0,41	98%	-7,99	-38%	7,09	2,97	21,07	1,28
08.05.2008	15,67	269,90	42,75	12,58	1,13 €	0,29	78%	-2,99	-19%	5,11	3,11	16,11	1,40
09.05.2008	16,68	335,88	53,20	18,21	1,64 €	0,34	115%	-8,08	-51%	5,09	3,11	15,85	0,63
10.05.2008	17,38	335,30	53,11	20,53	1,85 €	0,39	200%	-14,52	-142%	3,32	3,09	10,25	0,92
11.05.2008	17,51	331,39	52,49	18,42	1,66 €	0,35	182%	-12,56	-124%	3,26	3,10	10,10	0,97
12.05.2008	17,81	328,51	52,04	18,20	1,64 €	0,35	175%	-12,15	-117%	3,42	3,05	10,41	0,96
13.05.2008	17,74	323,54	51,25	17,07	1,54 €	0,33	194%	-11,97	-136%	2,79	3,15	8,78	0,89
14.05.2008	16,35	323,44	51,23	14,23	1,28 €	0,28	153%	-8,88	-96%	2,99	3,11	9,29	0,96
15.05.2008	15,90	212,96	33,73	9,70	0,87 €	0,29	69%	-1,45	-10%	4,57	3,07	14,04	1,22
16.05.2008	15,92	134,38	21,29	1,81	0,16 €	0,09	18%	4,52	46%	3,15	3,14	9,89	0,40
17.05.2008	16,51	170,03	26,93	7,38	0,66 €	0,27	50%	1,08	7%	4,71	3,11	14,64	1,48
18.05.2008	12,11	123,60	19,58	3,64	0,33 €	0,19	14%	12,86	49%	8,46	3,09	26,09	1,14
19.05.2008	12,99	234,83	37,20	11,30	1,02 €	0,30	41%	5,71	21%	8,83	3,12	27,52	1,68
20.05.2008	12,87	257,63	40,81	9,77	0,88 €	0,24	37%	6,89	26%	8,53	3,11	26,54	1,34
21.05.2008	13,28	199,00	31,52	5,60	0,50 €	0,18	22%	10,88	42%	8,34	3,11	25,93	1,11
22.05.2008	13,61	168,24	26,65	7,47	0,67 €	0,28	28%	8,92	33%	8,60	3,11	26,72	1,72
23.05.2008	14,14	121,95	19,32	3,58	0,32 €	0,19	13%	13,45	49%	8,95	3,06	27,42	1,44
24.05.2008	15,84	253,88	40,21	16,46	1,48 €	0,41	98%	-6,63	-39%	5,39	3,13	16,83	1,61
25.05.2008	17,40	295,99	46,88	15,41	1,39 €	0,33	100%	-6,16	-40%	4,94	3,13	15,44	1,26
26.05.2008	18,01	122,75	19,44	7,02	0,63 €	0,36	68%	-1,72	-17%	3,23	3,19	10,28	1,75
27.05.2008	16,96	237,91	37,68	9,39	0,84 €	0,25	92%	-3,81	-37%	3,31	3,10	10,25	1,37
28.05.2008	20,08	265,53	42,06	15,09	1,36 €	0,36	159%	-10,27	-108%	3,00	3,16	9,48	1,66
29.05.2008	21,12	267,86	42,43	14,16	1,27 €	0,33	201%	-10,70	-152%	2,28	3,09	7,05	1,31
30.05.2008	23,43	313,31	49,63	20,39	1,84 €	0,41	677%	-19,10	-634%	0,97	3,11	3,01	0,75
31.05.2008	22,13	281,28	44,55	13,80	1,24 €	0,31	-----	-14,83	-----	0,00	0,00	0,00	0,99
Mai 2008 gesamt (hochgerechnet)	16,36	250,03	1188KWh	378KWh	33,99 €	0,32	78,10%	-89KWh	-18,37%	157KWh	3,09	484KWh	38KWh

Diagramm 44 Ertragsdaten detailliert Mai 2008

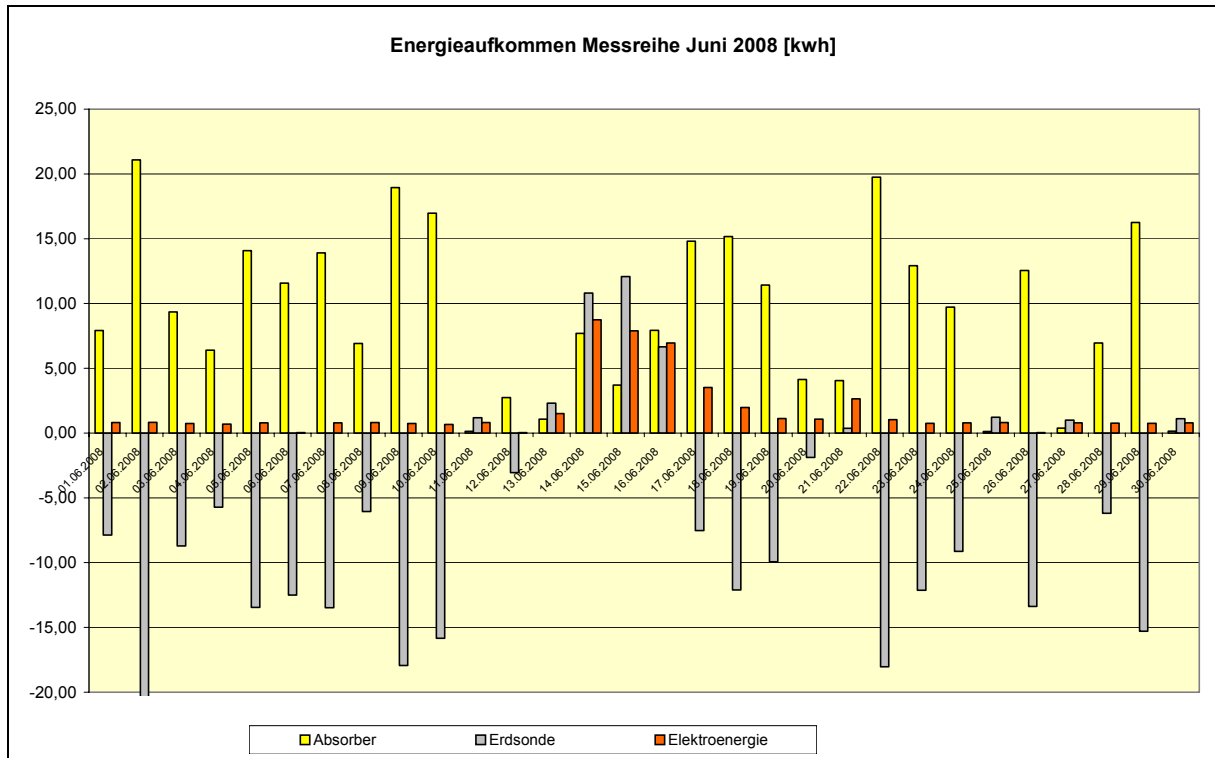


Diagramm 45 Energieaufkommen Juni 2008

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tages-durchschnitts-temperatur 24h [°C]	Tages-durchschnitts-einstrahlung 24h [W/m²]	Einstrahlung auf Aperturfäche 6,6m² [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9ct/KWh]	Absorber-wirkungsgrad	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-entzug [KWh]	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-aufnahme [KWh]	COP		
01.06.2008	21,98	258,45	40,94	7,92	0,71 €	0,19	362%	-7,88	-361%	0,81	2,70	2,18	1,34
02.06.2008	23,90	319,18	50,56	21,08	1,90 €	0,42	889%	-20,62	-869%	0,83	2,87	2,37	1,08
03.06.2008	21,32	223,77	35,45	9,36	0,84 €	0,26	428%	-8,72	-398%	0,73	2,99	2,19	0,82
04.06.2008	19,97	213,44	33,81	6,40	0,58 €	0,19	310%	-5,73	-278%	0,70	2,97	2,06	0,70
05.06.2008	20,45	329,04	52,12	14,07	1,27 €	0,27	627%	-13,46	-600%	0,79	2,85	2,25	0,85
06.06.2008	19,57	272,72	43,20	11,57	1,04 €	0,27	627%	-12,51	-586%	0,00	0,00	0,00	0,89
07.06.2008	21,08	305,92	48,46	13,91	1,25 €	0,29	605%	-13,47	-586%	0,79	2,92	2,30	1,08
08.06.2008	20,17	313,37	49,64	6,92	0,62 €	0,14	319%	-6,06	-279%	0,81	2,67	2,17	0,49
09.06.2008	20,57	331,38	52,49	18,96	1,71 €	0,36	879%	-17,95	-833%	0,73	2,95	2,16	0,41
10.06.2008	21,42	330,66	52,38	16,98	1,53 €	0,32	775%	-15,85	-723%	0,65	3,36	2,19	0,40
11.06.2008	16,99	142,91	22,64	0,13	0,01 €	0,01	6%	1,18	53%	0,81	2,76	2,24	0,12
12.06.2008	14,74	237,81	37,67	2,74	0,25 €	0,07	27%	-3,05	-12%	0,00	0,00	0,00	0,26
13.06.2008	12,15	178,34	28,25	1,08	0,10 €	0,04	22%	2,31	47%	1,51	3,23	4,89	-0,01
14.06.2008	12,86	205,07	32,48	7,69	0,69 €	0,24	27%	10,80	39%	8,75	3,20	28,04	0,80
15.06.2008	13,59	183,08	29,00	3,70	0,33 €	0,13	15%	12,08	49%	7,89	3,11	24,54	0,87
16.06.2008	13,51	246,74	39,08	7,92	0,71 €	0,20	36%	6,66	30%	6,95	3,17	22,02	0,49
17.06.2008	17,20	276,65	43,82	14,80	1,33 €	0,34	124%	-7,52	-63%	3,53	3,39	11,95	1,14
18.06.2008	19,25	269,49	42,69	15,17	1,37 €	0,36	262%	-12,11	-209%	1,97	2,93	5,79	0,76
19.06.2008	20,54	223,60	35,42	11,42	1,03 €	0,32	329%	-9,93	-286%	1,12	3,10	3,47	0,86
20.06.2008	18,24	252,02	39,92	4,15	0,37 €	0,10	118%	-1,87	-53%	1,08	3,25	3,52	0,17
21.06.2008	17,19	203,87	32,29	4,04	0,36 €	0,13	50%	0,37	5%	2,64	3,08	8,12	1,07
22.06.2008	23,91	291,31	46,14	19,76	1,78 €	0,43	537%	-18,04	-490%	1,03	3,58	3,68	0,94
23.06.2008	18,94	342,94	54,32	12,92	1,16 €	0,24	577%	-12,12	-541%	0,76	2,95	2,24	0,68
24.06.2008	18,87	320,74	50,81	9,73	0,88 €	0,19	464%	-9,13	-436%	0,78	2,68	2,10	0,72
25.06.2008	19,19	121,16	19,19	0,12	0,01 €	0,01	6%	1,22	56%	0,81	2,66	2,16	0,01
26.06.2008	18,98	307,32	48,68	12,55	1,13 €	0,26	537%	-13,38	-50%	0,00	0,00	0,00	0,78
27.06.2008	17,50	174,89	27,70	0,38	0,03 €	0,01	18%	1,00	48%	0,78	2,67	2,09	-0,07
28.06.2008	18,35	173,96	27,55	6,96	0,63 €	0,25	317%	-6,19	-282%	0,76	2,88	2,20	0,66
29.06.2008	21,03	319,93	50,68	16,26	1,46 €	0,32	771%	-15,29	-725%	0,75	2,80	2,11	0,38
30.06.2008	19,59	242,06	38,34	0,15	0,01 €	0,01	7%	1,11	51%	0,79	2,78	2,19	0,15
Juni 2008 gesamt (hochgerechnet)	18,77	253,73	1206KWh	279KWh	25,10 €	0,23	181,98%	-194KWh	-126,70%	50KWh	2,99	153KWh	19KWh

Tabelle 19 Ertragsdaten detailliert Juni 2008

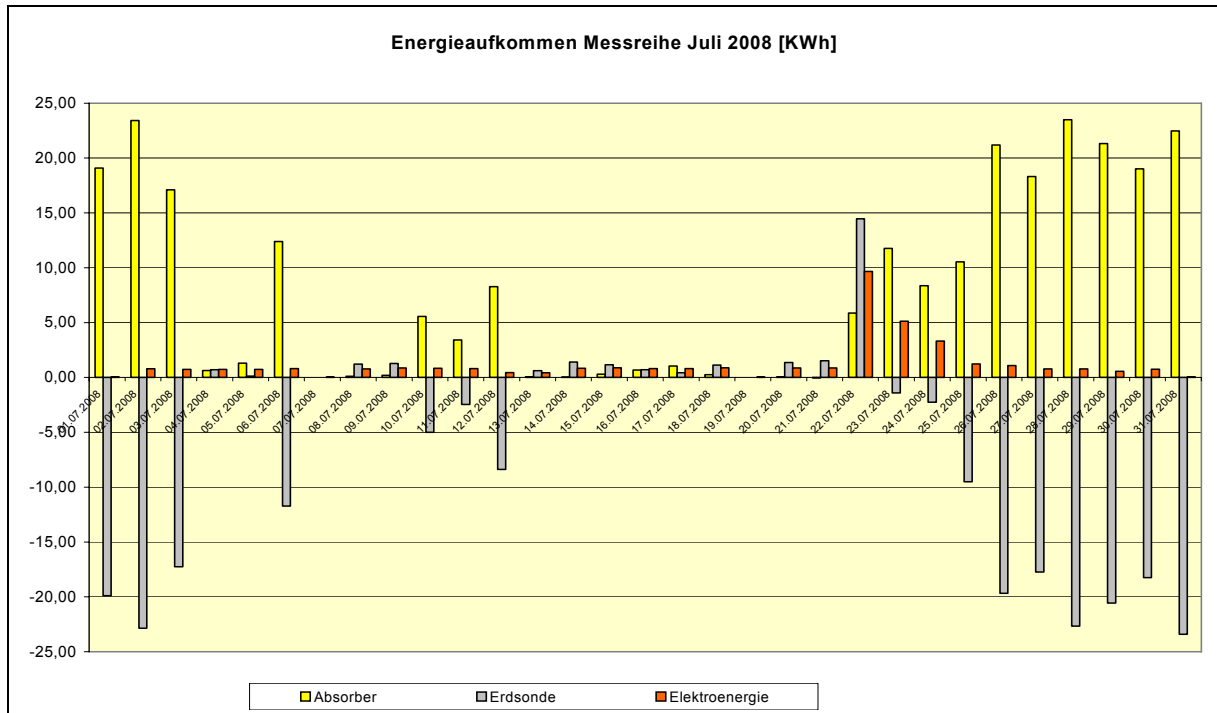


Diagramm 46 Energieaufkommen Juli 2008

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tagesdurchschnittstemperatur 24h [°C]	Tagesdurchschnittseinstrahlung 24h [W/m²]	Einstrahlung auf Aperturfläche 6,6m² [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9Ct/KWh]	Absorberwirkungsgrad	Anteil am Gesamtenergieaufkommen	Energieentzug [KWh]	Anteil am Gesamtenergieaufkommen	Energieaufnahme [KWh]	COP		
01.07.2008	21,16	326,22	51,67	19,08	1,72	0,37	-----	-19,90	-----	0,04	0,00	0,00	0,77
02.07.2008	25,04	343,20	54,36	23,43	2,11	0,43	1049,96%	-22,85	-1023,98%	0,80	2,80	2,23	0,85
03.07.2008	24,94	235,06	37,23	17,10	1,54	0,46	817,32%	-17,25	-824,75%	0,73	2,86	2,09	1,51
04.07.2008	19,13	204,65	32,42	0,63	0,06	0,02	29,95%	0,71	33,35%	0,73	2,89	2,12	0,04
05.07.2008	17,53	169,35	26,82	1,30	0,12	0,05	61,29%	0,12	5,64%	0,73	2,91	2,13	-0,03
06.07.2008	20,66	198,40	31,43	12,39	1,12	0,39	549%	-11,73	-520%	0,80	2,82	2,26	0,79
07.07.2008	19,21	227,01	35,96	0,00	0,00	0,00	-----	0,00	-----	0,04	0,00	0,00	-0,04
08.07.2008	17,44	212,83	33,71	0,10	0,01	0,00	4,91%	1,22	59,29%	0,78	2,64	2,06	-0,04
09.07.2008	16,51	236,03	37,39	0,18	0,02	0,00	7,97%	1,27	55,23%	0,86	2,67	2,30	-0,02
10.07.2008	18,85	124,21	19,67	5,56	0,50	0,28	238,89%	-5,00	-214,70%	0,84	2,77	2,33	0,92
11.07.2008	20,62	138,45	21,93	3,42	0,31	0,16	147,71%	-2,45	-105,95%	0,81	2,84	2,32	0,53
12.07.2008	19,66	206,09	32,64	8,29	0,75	0,25	683,42%	-8,39	-692,02%	0,45	2,69	1,21	0,87
13.07.2008	15,88	80,82	12,80	0,07	0,01	0,01	6,02%	0,62	57,08%	0,43	2,52	1,09	-0,03
14.07.2008	17,10	208,78	33,07	0,03	0,00	0,00	1,15%	1,40	63,71%	0,84	2,64	2,20	-0,06
15.07.2008	18,92	212,72	33,70	0,29	0,03	0,01	13,03%	1,14	50,86%	0,88	2,57	2,25	-0,06
16.07.2008	18,47	100,19	15,87	0,67	0,06	0,04	30,93%	0,71	32,57%	0,81	2,69	2,18	-0,02
17.07.2008	16,26	180,60	28,61	1,04	0,09	0,04	46,50%	0,43	19,02%	0,80	2,78	2,24	-0,03
18.07.2008	17,11	113,11	17,92	0,26	0,02	0,01	11%	1,14	49%	0,87	2,67	2,32	0,05
19.07.2008	17,63	138,82	21,99	0,00	0,00	0,00	-----	0,00	-----	0,04	0,00	0,00	-0,04
20.07.2008	16,79	207,65	32,89	0,05	0,00	0,00	2,39%	1,35	59,27%	0,87	2,63	2,28	0,01
21.07.2008	13,70	82,05	13,00	-0,04	0,00	0,00	-1,69%	1,52	66,50%	0,86	2,65	2,29	-0,06
22.07.2008	14,39	116,46	18,45	5,87	0,53	0,32	19,14%	14,47	47,18%	9,66	3,17	30,68	0,67
23.07.2008	17,12	213,00	33,74	11,77	1,06	0,35	71,58%	-1,41	-8,61%	5,12	3,21	16,44	0,97
24.07.2008	18,07	206,42	32,70	8,36	0,75	0,26	80,16%	-2,25	-21,58%	3,32	3,14	10,43	1,00
25.07.2008	22,06	174,17	27,59	10,53	0,95	0,38	290,23%	-9,50	-261,78%	1,23	2,95	3,63	1,37
26.07.2008	25,03	317,59	50,31	21,19	1,91	0,42	663,62%	-19,67	-616,03%	1,09	2,93	3,19	0,59
27.07.2008	24,83	277,28	43,92	18,31	1,65	0,42	820,26%	-17,72	-793,99%	0,78	2,86	2,23	0,87
28.07.2008	25,05	323,47	51,24	23,49	2,11	0,46	1078,77%	-22,67	-1041,01%	0,78	2,79	2,18	0,57
29.07.2008	25,72	307,79	48,75	21,32	1,92	0,44	1098,97%	-20,56	-1059,87%	0,57	3,39	1,94	0,61
30.07.2008	24,19	290,16	45,96	19,02	1,71	0,41	843%	-18,24	-809%	0,75	2,99	2,26	0,73
31.07.2008	25,14	298,51	47,28	22,48	2,02	0,48	-----	-23,40	-----	0,05	0,00	0,00	0,87
Juli 2008 gesamt (hochgerechnet)	19,81	155,31	1025KWh	256KWh	23,06 €	0,25	231,10%	-197KWh	-177,60%	37KWh	2,83	111KWh	14KWh

Tabelle 20 Ertragsdaten detailliert Juli 2008

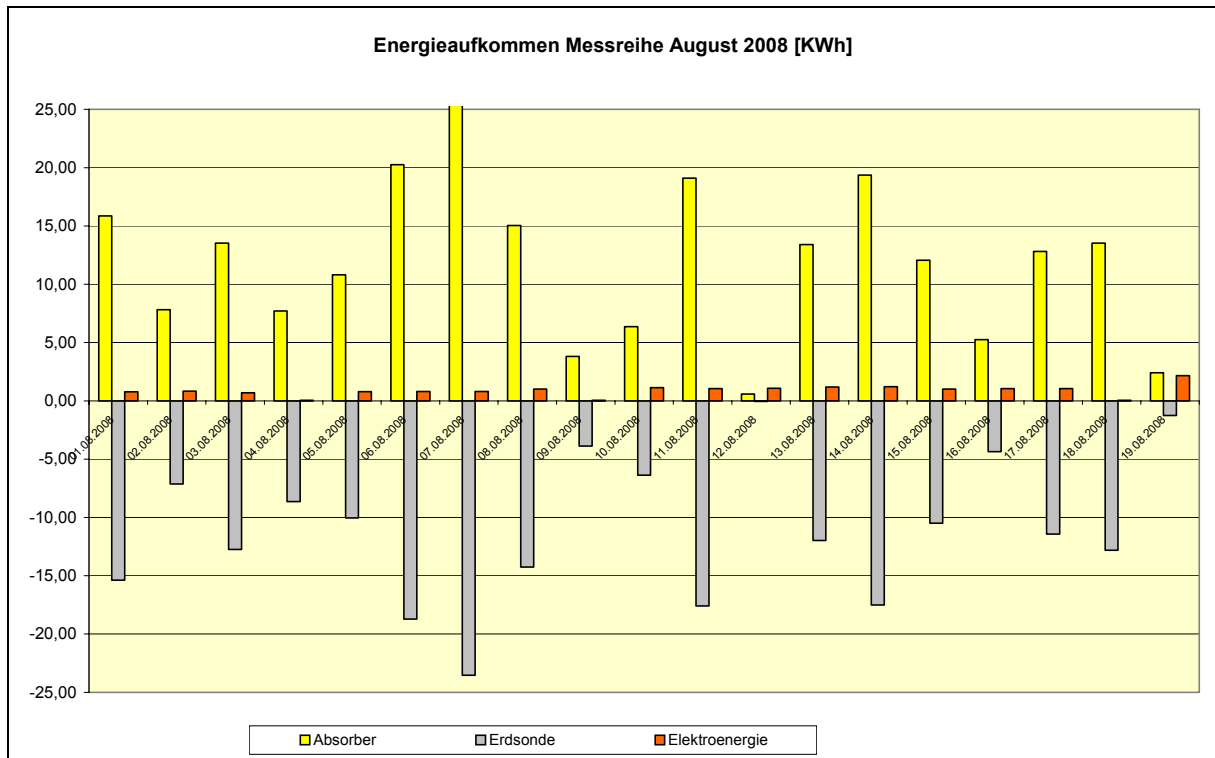


Diagramm 47 Energieaufkommen August 2008

Datum	Wetter		Absorber					Erdsonde		Elektroenergie		Energieabgabe [KWh]	sonstige Faktoren [KWh]
	Tages-durchschnitts-temperatur 24h [°C]	Tages-durchschnitts-einstrahlung 24h [W/m ²]	Einstrahlung auf Aperturfäche 6,6m ² [KWh]	Energieertrag [KWh]	Ertrag [9ct/KWh]	Absorber-wirkungsgrad	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-entzug [KWh]	Anteil am Gesamt-energie-aufkommen	Energie-aufnahme [KWh]	COP		
01.08.2008	23,82	199,85	31,66	15,86	1,43	0,50		-15,38		0,78	2,84	2,22	0,96
02.08.2008	20,47	125,92	19,95	7,82	0,70	0,39	327,58%	-7,13	-298,66%	0,83	2,89	2,39	0,87
03.08.2008	22,41	212,89	33,72	13,52	1,22	0,40	637,72%	-12,75	-601,26%	0,69	3,07	2,12	0,66
04.08.2008	21,06	174,61	27,66	7,72	0,69	0,28		-8,64		0,05	0,00	0,00	0,88
05.08.2008	19,32	253,76	40,20	10,82	0,97	0,27	493,50%	-10,04	-458,20%	0,78	2,79	2,19	0,63
06.08.2008	20,73	274,80	43,53	20,26	1,82	0,47	915%	-18,71	-845%	0,81	2,72	2,21	-0,14
07.08.2008	25,61	315,67	50,00	25,42	2,29	0,51		-23,54		0,80	2,74	2,20	-0,48
08.08.2008	21,45	248,73	39,40	15,03	1,35	0,38	674,28%	-14,26	-639,68%	1,01	2,20	2,23	0,45
09.08.2008	16,93	176,80	28,01	3,81	0,34	0,14		-3,89		0,05	0,00	0,00	0,03
10.08.2008	18,39	92,69	14,68	6,35	0,57	0,43	290,10%	-6,37	-290,97%	1,14	1,92	2,19	1,07
11.08.2008	21,41	306,81	48,60	19,11	1,72	0,39	844,04%	-17,59	-777,27%	1,05	2,16	2,26	-0,29
12.08.2008	15,29	45,04	7,13	0,58	0,05	0,08	25,55%	-0,06	-2,49%	1,08	2,08	2,25	0,65
13.08.2008	15,72	256,02	40,55	13,41	1,21	0,33	583,65%	-11,97	-521,16%	1,18	1,94	2,30	-0,32
14.08.2008	17,56	300,08	47,53	19,37	1,74	0,41	878,83%	-17,50	-794,10%	1,21	1,81	2,20	-0,88
15.08.2008	19,83	176,04	27,88	12,06	1,09	0,43	543,02%	-10,49	-472,42%	1,02	2,19	2,22	-0,36
16.08.2008	20,62	93,85	14,87	5,25	0,47	0,35	230,75%	-4,36	-191,72%	1,05	2,18	2,28	0,34
17.08.2008	19,16	217,96	34,52	12,82	1,15	0,37	587,54%	-11,42	-523,37%	1,05	2,09	2,18	-0,26
18.08.2008	19,52	238,75	37,82	13,53	1,22	0,36		-12,82		0,05	0,00	0,00	-0,76
19.08.2008	16,05	44,97	7,12	2,40	0,22	0,34		-1,25		2,16	1,99	4,31	1,00
August 2008 gesamt (hochgerechnet)	19,76	147KWh	971KWh	367KWh	33,06 €	0,38	596,29%	-340KWh	-551,39%	27KWh	2,38	62KWh	7KWh

Tabelle 21 Ertragsdaten detailliert August 2008

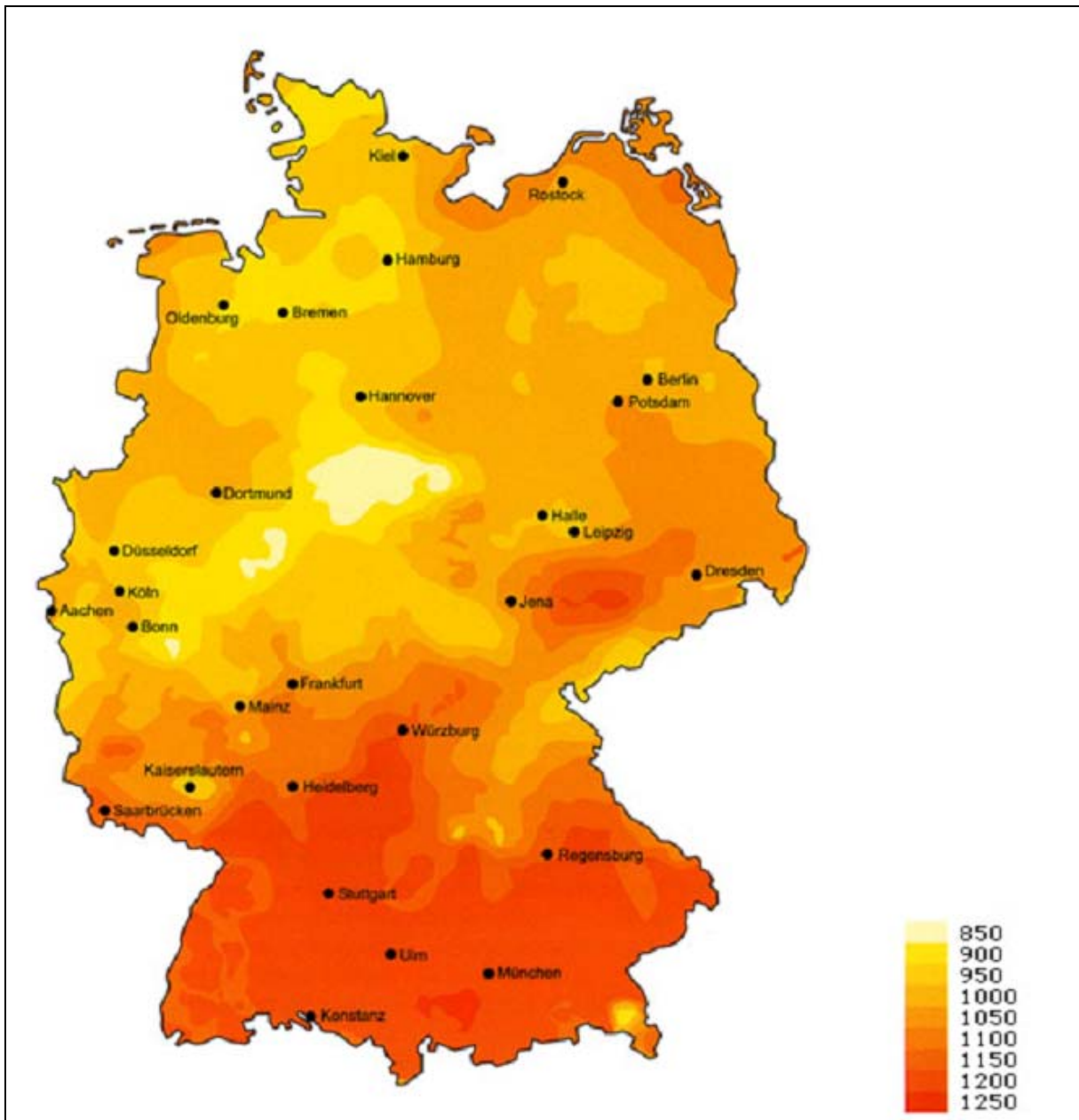


Abbildung 8 Jahreseinstrahlung Deutschland [29]