

FREE COOLING & SOLARE REGENERATION IM ERDWÄRMESONDENFELD – EIN WIDERSPRUCH?

Fachartikel

Autor: Markus Widmer, EK Energiekonzepte AG, einem Mitglied der Allianz 2SOL

2. Februar 2018

Free Cooling, darunter versteht man die direkte Gebäudekühlung ohne Einsatz einer Kältemaschine, wird bei Erdwärmesondenanlagen oft als gratis nutzbarer Komfortgewinn angepriesen. Doch bei grossen Anlagen mit solarer Regeneration kann sich ein Zielkonflikt durch die auftretenden hohen Regenerationsleistungen im Sommer ergeben. Warum sich eine Optimierung des Gesamtsystems auf den Heizfall lohnt, und wie die Gratiskälte aus der Brauchwarmwasserbereitung genutzt werden kann, zeigt der folgende Artikel auf.

Ausgangslage: Kühlung erwünscht!

Sogenanntes Free Cooling - direkte Kühlung ohne Einsatz einer Kältemaschine – wird bei Erdwärmesondenanlagen oft als gratis nutzbarer Komfortgewinn und als Effizienzsteigerung angepriesen. Einerseits würden die Räume im Sommer angenehm gekühlt und gleichzeitig der Erdwärmespeicher für den kommenden Winterbetrieb regeneriert. Entsprechend wünschen sich viele Bauherrschaften eine solche sanfte Gebäudekühlung, wenn grossflächige Abgabesysteme wie Fussbodenheizungen oder thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) geplant oder schon vorhanden sind.

Bei der Auslegung und Optimierung von regenerierten Erdwärmesondenfeldern in Kombination mit Free Cooling stossen wir aber auf Effekte, welche diese Versprechungen in Frage stellen. Im Folgenden sollen diese Effekte und die wichtigsten Einflussgrössen diskutiert, sowie Nutzen und Abhängigkeiten beim Free Cooling in regenerierten Erdwärmesondenanlagen erläutert werden.

Ist eine Regeneration des Erdspeichers nötig?

Ob eine Regeneration im Einzelfall nötig und/oder wirtschaftlich sinnvoll ist, muss aufgrund der minimal auftretenden Sondeneintrittstemperatur nach einem 50-jährigen Anlagenbetrieb mittels einer dynamischen, thermischen Simulation beurteilt werden.

Wird hier von „grösseren Erdwärmesondenanlagen“ gesprochen, sind damit Erdwärmesondenfelder mit einer Vielzahl an Sonden in mehrreihiger Anordnung gemeint. Die „typische Nutzung“ meint einen hohen Anteil an Wohnen. Unter diesen Rahmenbedingungen muss eine Regeneration des Erdspeichers in der Regel umgesetzt werden, um die Temperaturverhältnisse im Erdreich langfristig im nutzbaren Bereich zu halten.



Es gibt verschiedene Quellen für die Gewinnung der zur Regeneration nötigen Energie: Zum Beispiel über Gebäudekühlung, über Solarthermie, über Luft-Wasser-Wärmetauscher, über externe Abwärme (z.B. aus der Industrie), oder eine Kombination der genannten Quellen. Jede dieser Regenerationsquellen hat eigene Charakteristika in Bezug auf die zeitliche Verteilung der Regenerationsleistung, das Temperaturniveau und die zur Verfügung stehenden Energiemengen. Grob können die Regeneration aus der Gebäudekühlung, die Regeneration mittels Luft-Wasser-Wärmetauscher und die Solarthermie unter „solarer Regeneration“ zusammengefasst werden, weil sich ihre Verfügbarkeit im Wesentlichen parallel zur solaren Einstrahlung entwickelt. Industrielle Abwärme ist ein Spezialfall und wird hier nicht weiter vertieft, zumal aufgrund der Individualität der Quellen keine generellen Aussagen möglich sind.

Die folgende Diskussion der Einflussfaktoren und Wechselwirkungen ist nicht abschliessend und jede Anlage stellt einen Einzelfall dar. Dennoch bietet sie interessierten Akteuren eine Orientierungshilfe.

Solare Regeneration und Free Cooling im Zielkonflikt

Gemäss dem Ansatz von 2SOL möchte man ein regeneriertes Erdwärmesondenfeld mit möglichst hoher Quellentemperatur betreiben, um die Arbeitszahl der Wärmepumpe im Heizfall zu verbessern und damit den Exergiebedarf des Systems im Heizfall zu reduzieren. Die Kür dieses Ansatzes liegt darin, das Sondenfeld mit reinem Wasser (ohne Frostschutzzusätze) zu betreiben und dabei langfristig eine minimale Sondeneintrittstemperatur von $+4^{\circ}\text{C}$ einzuhalten. Dies bedingt eine abgestimmte Grösse der solaren Regenerationsflächen. In solar regenerierten Erdwärmesondenfeldern stehen damit die höchsten Regenerationsleistungen in der heissesten Jahreszeit und tagsüber zur Verfügung, wenn die solare Einstrahlung maximal ist.

Falls Free Cooling in Kombination mit solarer Regeneration umgesetzt wird, hat dies zur Folge, dass die Erdwärmesonden in der intensiven Kühlperiode von Juni bis August „doppelt“ belastet werden, weil die Spitzenleistung der Regeneration zeitgleich mit dem höchsten Kühlbedarf des Gebäudes anfällt.

Der Temperaturverlauf in den Erdwärmesonden in der Kühlperiode einer nach den obigen Kriterien ausgelegten Anlage ist in der Abbildung 1 dargestellt. Dieses Projekt wurde gemäss Energiebedarfskennwerten nach SIA 2024 dimensioniert und weist bei rund 1.1 GWh Wärmebedarf pro Jahr ca. 290 MWh Kältebedarf auf. Die Regeneration wird neben der Kühlung über 800 m² PVT-Kollektoren (360 kWh/m² spezifischer Ertrag) erbracht und erreicht rund 70% in der Jahresbilanz. Die Sonden sind mit reinem Wasser gefüllt.

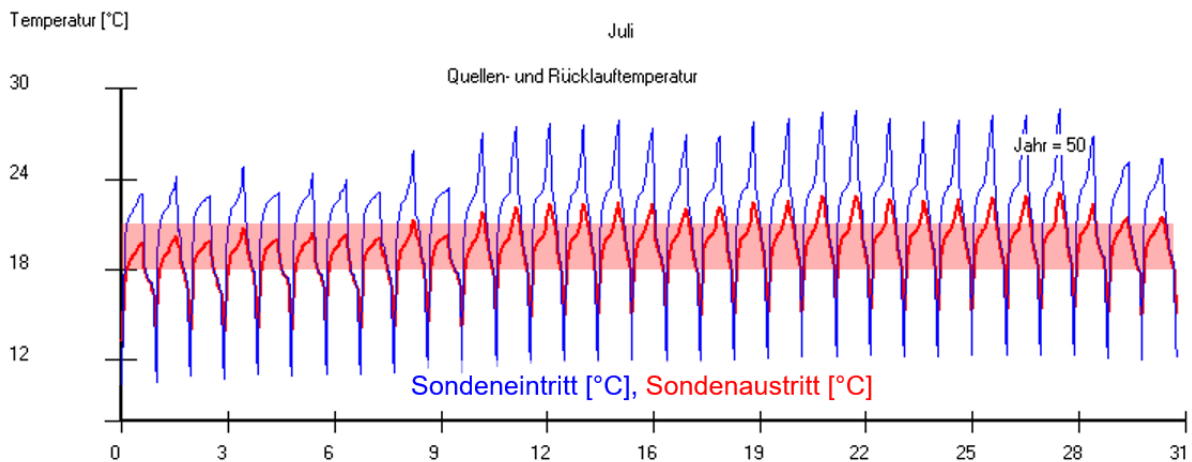


Abbildung 1: Beispielhafter Temperaturverlauf der Erdwärmesonden eines solar teilregenerierten Erdwärmesondenfelds im Juli. Der für Free Cooling optimal nutzbare Bereich der Sondenaustrittstemperatur ist rot markiert. Quellen: EWS, Berechnungen EK Energiekonzepte AG

In der Darstellung wird deutlich, dass die Ein- und Austrittstemperatur der Sonden an den Tagen mit hoher solarer Regenerationsleistung im Juli und gleichzeitig hohem Kältebedarf regelmässig über 20°C steigen und damit die Nutzung von Free Cooling nur noch reduziert möglich oder ganz verhindert ist. Dann besteht ein Zielkonflikt zwischen der solaren Regeneration des Erdwärmesondenfelds und der Nutzung von Free Cooling.

Insbesondere grosse Felder tiefer Erdwärmesonden in kompakter Anordnung (geringer Sondenabstand, mehrreihige Felder) mit reinem Wasser und hohen Regenerationsanteilen sind für die Kombination von solarer Regeneration und Free Cooling kritisch, weil die Sondenaustrittstemperatur sich häufiger nahe an oder über der Grenze für Free Cooling bewegt.

Nun könnte man einwenden, dass zur Lösung des Problems die gesamte Anlage auf den Kühlfall optimiert werden könnte, indem weniger tiefe Sonden, weniger Regeneration und eine Nutzung von Frostschutzzusätzen im Sondenfluid zum Einsatz kommen sollen. Doch diese Lösung überzeugt in unserem Beispiel nicht, wie die Darstellung im folgenden Abschnitt zeigt.

Warum nicht auf maximales Free Cooling auslegen?

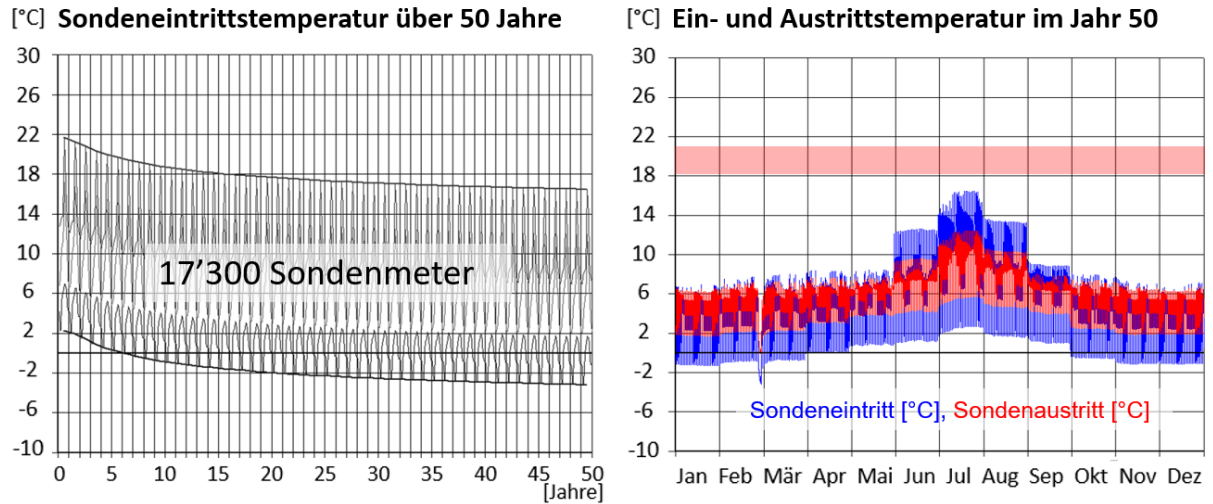
Die Energiekosten der Heizperiode sind bei typischen Kälte-zu-Wärme-Verhältnissen von Wohnnutzungen mit moderatem Gewerbe- oder Büroanteil gegenüber der Kühlperiode dominant. Würde die Erdwärmesondenanlage konsequent im Hinblick auf eine maximale Nutzung von Free Cooling ausgelegt, dann hätte dies aufgrund der resultierenden, tieferen Quelltemperaturen empfindliche Effizienzeinbussen im Heizfall und damit höhere Betriebskosten in der Heizperiode zur Folge.

In der Abbildung 2 sind je die optimierte Auslegung des Erdwärmesondenfelds aus dem vorherigen Beispiel auf den Heiz- und den Kühlfall dargestellt.



Variante 1: Auslegung für Free Cooling

108 x 160 m Sonden, 59% Regeneration mit 297 m² PVT und Free Cooling, Auslegung auf -3°C



Variante 2: Auslegung für den Heizfall

35 x 400 m, 79% Regeneration mit 800 m² PVT, Free Cooling & mech. Kühlung, Auslegung auf +4°C

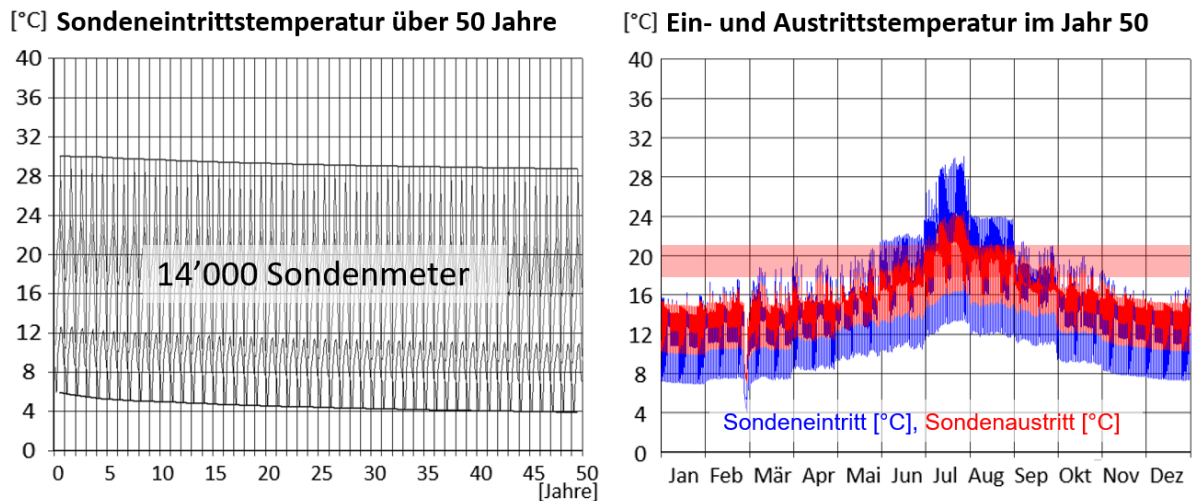


Abbildung 2: Vergleich eines auf den Kühlfall (Variante 1) und den Heizfall (Variante 2) ausgelegten und optimierten Erdwärmesondenfelds mit Regeneration. Der für Free Cooling nutzbare Temperaturbereich ist in der jeweils rechten Grafik als rotes Band markiert. Quelle: EWS, Berechnungen EK Energiekonzepte AG

Die Variante 1 wurde für Free Cooling optimiert und benötigt 17.3 km Erdwärmesonden in drei kompakten Feldern, sowie rund 300 m² Kollektorfläche, um die minimale Eintrittstemperatur von -3°C nach 50 Betriebsjahren einzuhalten. Im Gegenzug kann der gesamte Kältebedarf über Free Cooling gedeckt werden. Kritisch sind in dieser Variante nur die ersten Betriebsjahre, wenn das Erdreich noch nicht ausgekühlt wurde (vgl. linker Teil der Abbildungen zur Variante 1).



Die Variante 2 wurde konsequent auf den Heizfall optimiert, indem tiefere Sonden, mehr Regenerationsanteil und reines Wasser als Wärmeträger zum Einsatz kommen. Dies verbessert den COP des Heizfalls deutlich, weil die Quelltemperatur deutlich höher ausfällt (rechter Teil der Abbildung 1). Im Gegenzug ist aber in den relevanten Monaten nur noch ein geringer Anteil des Kältebedarfs über freie Kühlung zu decken, da die Sondentemperaturen dafür zu hoch sind (rechter Teil der Abbildungen zur Variante 2). Deshalb wurde in diesem Beispiel eine mechanische Kälteerzeugung berücksichtigt, welche die fehlende Kälte liefert.

Die auf den Heizfall ausgelegte Variante 2 benötigt inklusive Kühlung 12% weniger Strom und produziert 2.7-mal mehr PV-Strom auf dem Areal als die Variante 1. Der Strom für die mechanische Kühlung fällt wenig ins Gewicht und wird grossenteils durch die grösser dimensionierte PVT-Anlage zeitgleich vor Ort erzeugt.

Die Kostenanalyse zeigt, dass die rund 30% höheren Investitionskosten der Variante 2 durch die deutlich bessere Effizienz im Heizfall und den Eigenverbrauch von PV-Strom innert rund 25 Jahren amortisiert werden können. In Anbetracht der erwarteten, langen Lebensdauer insbesondere der Erdwärmesondenanlage ist dies ein akzeptabler Wert, wenn eine Lebenszyklusperspektive angewendet wird.

Eine Auslegung und Optimierung des regenerierten Erdwärmesondenfelds auf den Heizfall ist unter diesen Rahmenbedingungen energetisch und ökonomisch sinnvoll. Das gemäss den Prinzipien von 2SOL optimierte System spart im Heizfall Exergie und nimmt dafür etwas Stromverbrauch im Sommer für die mechanische Kühlung in Kauf.

Welche Möglichkeiten gibt es, um trotz solarer Regeneration energieeffizient kühlen zu können?

Es gibt prinzipiell drei mögliche Kältequellen in Wärmepumpensystemen mit Erdwärmesonden, unabhängig davon, ob das Sondenfeld regeneriert wird oder nicht. Die Reihenfolge der folgenden Liste ist als Priorisierung der Betriebszustände zu verstehen und sollte in der übergeordneten Anlagenregelung vorgesehen werden:

- **1. Priorität: Nutzung des abgekühlten Sondenfluids während des Betriebs der Wärmepumpe.** Diese „Gratiskälte“ tritt im Sommer vor allem beim Betrieb der Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung auf. Am elegantesten funktioniert dies, wenn invertiergeregelte Wärmepumpen eingesetzt werden, deren Wärmeleistung in der Kühlperiode (tagsüber) entsprechend dem Kältebedarf geregelt wird. Die laufende Nachladung des Brauchwarmwassers in die vollen Puffer hat eine Einbusse beim COP zur Folge, im Gegenzug kann aber die anfallende Kälte direkt genutzt werden.
- **2. Priorität: Free Cooling über die Erdsonde, soweit die Sondenaustrittstemperatur dies erlaubt.** Dies wird vor allem in der Übergangsjahreszeit oder morgens möglich sein. In den Spitzenzeiten solarer Regeneration wird das Free Cooling keinen grossen Beitrag liefern. Die Einbindung



des Wärmetauschers für das Free Cooling resp. die Nutzung der „Gratiskälte“ erfolgt in wassergefüllten Sonden am besten in Flussrichtung des Sondenfluids nach dem Verdampfer der Wärmepumpe, aber vor dem Solarwärmetauscher. Dies ist im Hinblick auf die eingangs beschriebene Limitierung solar regenerierter Erdwärmesondenfelder sinnvoll, um jedes Kelvin an „Gratiskälte“ nutzen zu können¹.

- **3. Priorität: Mechanische Kälteerzeugung mit Rückkühlung über die Sonden.**

Bei „kompromisslosen“ Kälteanforderungen kann zusätzlich mechanische Kälte zum Einsatz kommen. Es sind intern umschaltbare Wärmepumpen erhältlich, welche den hydraulischen Aufwand für die Realisierung der mechanischen Kälteerzeugung in Grenzen halten. Der Mehrbedarf an Strom für mechanische Kälteerzeugung kann bei mittels Hybridkollektoren regenerierten Sondenfeldern zu einem grossen Teil über selber produzierten PV-Strom (Eigenverbrauch) gedeckt werden.

Entscheidend für die Gestaltung des Kältekonzepts ist somit die Frage, ob zu jeder Zeit sichergestellt sein muss, dass vorhandener Kältebedarf zu 100% gedeckt werden kann, oder ob in Spitzenzeiten eine Unterdeckung akzeptiert wird.

Bei kompromissbereiten Bauherrschaften kann ein Kältekonzept ohne mechanische Kühlung Sinn machen, während bei zeitlich immer verfügbarer Kälteversorgung eine mechanische Kälteerzeugung vorhanden sein muss.

Einige Gedanken zum Aufwand

Free Cooling ist bei Erdwärmesondenanlagen nicht einfach „inklusive“. Neben Wärmetauscher, Ventilen, Hydraulik und Regelung ist im Bestand insbesondere die Installation von umschaltbaren Raumthermostaten nötig. Ein normales Thermostatventil mit Raumtemperaturfühler verhält sich im Kühlfall falsch und schliesst bei steigender Raumtemperatur. Es muss zudem sichergestellt werden, dass keine feuchtekritischen Räume (Bad, Küche) gekühlt werden und es zu einem Kondensatproblem kommt.

¹ Bei Erdwärmesonden mit Auslegung auf -3°C ist diese Lösung aufgrund von Frostrisiko im Wärmetauscher sowie der Einbusse beim COP der Wärmepumpe nicht zu empfehlen (vgl. dazu Afei, Th., Dott, R., Huber, A.: Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, 2007). Auch einstufige Wärmepumpen sprechen gegen diese Einbindung.



Fazit und Planungsempfehlungen

- **Jede Anlage ist ein Einzelfall und sollte mittels thermischer Simulationen über 50 Jahre fachgerecht ausgelegt werden.** Die aufgeführten Schlussfolgerungen gelten für die im Artikel erwähnten Randbedingungen und können nicht ohne weiteres auf alle regenerierten Erdwärmesondensysteme und Anlagegrössen übertragen werden.
- Die Gleichzeitigkeit hoher solarer Regeneration und der typischen Kühllast aus der Gebäudekühlung führt in der intensivsten Kühlperiode zu **erhöhten Sondenaustrittstemperaturen, welche die Nutzung von Free Cooling einschränken können.**
- **Der Heizfall dominiert bei einem hohen Anteil an Wohnnutzung typischerweise die Betriebskosten.** Eine Auslegung des solar regenerierten Erdwärmesondenfelds auf eine maximale Nutzung von Free Cooling ist langfristig sowohl energetisch als auch ökonomisch nicht sinnvoll. **Eine Optimierung des Erdwärmesondenfelds auf den Heizfall gemäss den Prinzipien von 2SOL spart trotz teils mechanischer Kälteerzeugung insgesamt Exergie und Kosten.**
- Während der Brauchwarmwassererwärmung über die Wärmepumpe ist der Sondereintritt einige Kelvin kälter als der Sondenaustritt. **Die Nutzung dieser „Gratis-Kälte“ kann bereits einen relevanten Teil des Kältebedarfs decken.** Modulierende Wärmepumpen eignen sich gut, um die Brauchwarmwasserbereitung in der Kühlperiode entsprechend dem Kältebedarf über den Tag zu verteilen. Dieser Betriebszustand sollte im Kühlfall als erste Priorität geregelt werden. Bei wassergefüllten Sonden kann der Wärmetauscher für das Free Cooling resp. die Nutzung der „Gratis-kälte“ aus der BWW-Bereitung direkt nach dem Verdampfer der Wärmepumpe platziert werden.
- **Falls der Kältebedarf kompromisslos gedeckt werden soll, muss eine mechanische Kälteerzeugung integriert werden.** Es sind Wärmepumpen mit interner Umschaltung zur Kältemaschine verfügbar. Dadurch kann der hydraulische Mehraufwand zur Einbindung der mechanischen Kühlung reduziert werden.
- **Der Stromverbrauch der mechanischen Kälteerzeugung** in der Kühlperiode kann mit typisch dimensionierten PVT-Anlagen zur Regeneration der Erdwärmesonden **weitgehend über Eigenverbrauch gedeckt** werden.

Der Autor:

Markus Widmer, Dipl. Umw. Natw. ETH und MAS Energieingenieur Gebäude HSLU/FHZ, ist seit 2011 bei EK Energiekonzepte AG verantwortlich für die Begleitung von 2SOL-Projekten. Die EK Energiekonzepte AG ist Mitglieder der Allianz 2SOL.

Kontakt:

EK Energiekonzepte AG, Sihlquai 55, 8005 Zürich; T +41 44 3 555 000; T +41 44 3 555 003 (direkt);
m.widmer@energiekonzepte.ch, www.energiekonzepte.ch