

Schlussbericht, 09. Dezember 2016

# Aktive Kühlung mit Erdwärmesonden

## Chancen und Risiken im Wohnungsbau



**energie schweiz**

Unser Engagement: unsere Zukunft.

**Autoren**

Phillip Rohner, Basler & Hofmann West AG

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.  
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

**Adresse**

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE  
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern  
Infoline 0848 444 444. [www.energieschweiz.ch/beratung](http://www.energieschweiz.ch/beratung)  
[energieschweiz@bfe.admin.ch](mailto:energieschweiz@bfe.admin.ch), [www.energieschweiz.ch](http://www.energieschweiz.ch)

# Inhalt

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>1 Ausgangslage und Zielsetzung</b> .....  | <b>5</b>  |
| 1.1 Motivation für die Durchführung des Projekts .....                                     | 5         |
| 1.2 Abgrenzung .....   | 5         |
| 1.3 Problematik / Fragestellung .....  | 5         |
| 1.4 Lösungsansatz .....  | 6         |
| <b>2 Kann die aktive Kühlung den geforderten Kühlbedarf decken?</b> .....                  | <b>7</b>  |
| 2.1 Verhältnis Heiz- / Kühlbedarf gemäss SIA 2024:2015.....                                | 7         |
| 2.2 Regeneration der Erdwärmesonde bei unterschiedlichen Jahresarbeitszahlen / ESEER ..... | 8         |
| 2.3 Berechnung des Heiz- / Kühlbedarf mittels SIA-TEC-Tool für ein Mehrfamilienhaus .....  | 10        |
| 2.4 Resultate der Berechnungen .....   | 11        |
| <b>3 Chancen und Risiken Abgabesysteme</b> .....   | <b>12</b> |

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurde untersucht, ob eine aktive Kühlung mittels reversibler Wärmepumpe und Erdwärmesonden im Wohnungsbau sinnvoll eingesetzt werden kann.

Durch die reversible Wärmepumpe sind theoretisch höhere Kälteleistungen möglich als beim Geocooling. Jedoch wird die effektive Raumkühlung durch das Kälteabgabesystem bestimmt. Da im untersuchten Gebäude das Geocooling bereits ausreicht, um die über die Fussbodenheizung definierte, maximale Kälteleistung zu erbringen, bringt die zusätzliche Leistung seitens Kälteerzeuger keinen Mehrwert bezüglich des thermischen Komforts.

Ein Vergleich der Heiz-Kühl-Bilanzen gemäss SIA 2024 zeigt auf, dass bei einer zunehmenden Effizienz im Heiz- sowie Kühlfall der reversiblen Wärmepumpe die Erdwärmesonde zunehmend ausgekühlt wird. Einzig bei den Zielwerten und den JAZ / ESEER unterhalb von 4 kann von einer ausreichenden Regeneration ausgegangen werden.

Wird die gleiche Berechnung für eine Erdwärmesonde mit Geocooling gemacht, so fällt beim Regenerieren der elektrische Anteil der reversiblen Wärmepumpe weg. Entsprechend wird durch reines Geocooling das Erdreich weniger stark regeneriert. Die höhere Regeneration dank der reversiblen Wärmepumpe ist allein auf den elektrischen Strombedarf zurückzuführen. Besteht bei einem expliziten Fall also ein hoher Bedarf an Regeneration, ist es energetisch nicht sinnvoll deshalb absichtlich eine reversible Wärmepumpe zu betreiben.

Die maximale Kälteabgabeleistung einer Fussbodenheizung wird auch aufgrund einer minimal zulässigen Vorlauftemperatur während dem Kühlfall eingeschränkt. Diese sollte aus Komfortgründen und zur Verhinderung von Kondenswasser nicht zu tief sein.

Zusammenfassend kann seitens thermischen Komforts gesagt werden, dass wenn durch Geocooling die maximal zulässige Kälteleistung des Abgabesystems erreicht wird, eine reversible Wärmepumpe keinen Mehrwert bringt.

# 1 Ausgangslage und Zielsetzung

## 1.1 Motivation für die Durchführung des Projekts

Die sommerliche Kühlung von Gebäuden stellt einen wachsenden Markt in den Gebäudedienstleistungen dar. Im Wohnungsbau sind die Hauptgründe für den zunehmenden Bedarf an sommerlicher Kühlung höhere thermische Lasten intern wie extern, gesteigerter Lebensstandard und Behaglichkeitsansprüche. Durch das verdichtete Bauen steigt die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden an und die Notwendigkeit einer Regeneration der Sonden nimmt zu.

Auf den ersten Blick scheint es sinnvoll, die Regeneration der Erdwärmesonde über die Kühlung der Wohngebäude mittels reversibler Wärmepumpe sicher zu stellen. Das vorliegende Dokument soll die Chancen und Risiken der aktiven Kühlung mittels Erdwärmesonde aufzeigen.

## 1.2 Abgrenzung

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf Gebäude, die folgende Eigenschaften aufweisen:

- Wärmeerzeugung mittels Erdwärmesonden-Wärmepumpe
- Regeneration der Erdwärmesonde notwendig
- hohe sommerliche Wärmelasten (intern und extern)
- hohe thermische Behaglichkeitsansprüche
- reversible Kompressions-Wärmepumpe, Antrieb durch Elektromotor
- Hinsichtlich der Bilanz der Erdwärmesonde wird nur der Entzug durch die Wärmepumpe und der Eintrag durch das Geocooling oder die aktive Kühlung berücksichtigt

Wie viel thermische Energie zur Regeneration der Erdwärmesonde notwendig ist, hängt von mehreren Faktoren ab (Dimensionierung der Erdwärmesonden, Erdwärmesonden in der Nachbarschaft, Bodenbeschaffenheit, etc.) und kann daher nicht pauschal beziffert werden.

## 1.3 Problematik / Fragestellung

Die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden im dicht bebauten Raum, die zunehmende Anzahl Erdwärmesonden -Nutzungen sowie die häufigeren und intensiveren Hitzeperioden (Klimaerwärmung) legitimieren die Frage nach einer aktiven Kühlung mittels Erdwärmesonden.

Aus dieser Problematik sind die folgenden zwei Fragen abgeleitet worden:

- Kann die aktive Kühlung den geforderten Kühlbedarf abdecken?
- Was ist bei den Kälte- bzw. Wärmeabgabesystemen in den Räumen zu beachten?

## 1.4 Lösungsansatz

Die Bearbeitung der Fragestellungen gliedert sich entsprechend der bearbeiteten Themen in folgende Arbeitsschritte:

- Verhältnis Heiz- / Kühlbedarf gemäss SIA 2024:2015 Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik
- Berechnung des Heiz- / Kühlbedarfs eines Mehrfamilienhauses mittels SIA-TEC-Tool
- Chancen und Risiken Kälte- bzw. Wärmeabgabesysteme

## 2 Kann die aktive Kühlung den geforderten Kühlbedarf decken?

### 2.1 Verhältnis Heiz- / Kühlbedarf gemäss SIA 2024:2015

Aufgrund des Verhältnisses Heiz- / Kühlleistungsbedarf können bezüglich Entzugsleistung und Regeneration grundlegende Aussagen abgeleitet werden. Vergleicht man den Norm Heizwärmeleistungsbedarf mit dem Klimakälteleistungsbedarf der Nutzung Wohnen MFH gemäss SIA 2024:2015, so stellt man heizungsseitig höhere Leistungen fest.

|                               |                  | Standardwert | Zielwert | Bestand |
|-------------------------------|------------------|--------------|----------|---------|
| Norm Heizwärmeleistungsbedarf | W/m <sup>2</sup> | 19.7         | 13.5     | 54.6    |
| Klimakälteleistungsbedarf     | W/m <sup>2</sup> | 12.0         | 10.0     | 21.0    |
| Anteil Kälte an Heizleistung  |                  | 61%          | 74%      | 38%     |

Tabelle 1: Norm Heizwärmeleistungsbedarf und Klimakälteleistungsbedarf für die Nutzung Wohnen MFH gemäss SIA 2024:2015

Der Leistungsbedarf entscheidet zwar über die Dimensionierung einer Erdwärmesonde, jedoch ist betreffend Regeneration der Vergleich auf Stufe Energie massgebend. Entsprechend sollen der jährliche Heizwärmebedarf und der jährliche Klimakältebedarf gegenüber gestellt werden. Ersteres lässt einen Rückschluss darauf ziehen, wie viel thermische Energie dem Erdreich während einem Jahr entzogen wird (abhängig von der JAZ), Zweiteres macht eine Aussage über die mögliche zurückzuführende thermische Energie. Diese Gegenüberstellung mit den Werten gemäss der SIA 2024:2015 ist in der untenstehenden Tabelle aufgezeigt.

|                                 |                    | Standardwert | Zielwert | Bestand |
|---------------------------------|--------------------|--------------|----------|---------|
| jährlicher Heizwärmebedarf      | kWh/m <sup>2</sup> | 19.4         | 11.2     | 112.9   |
| jährlicher Klimakältebedarf     | kWh/m <sup>2</sup> | 6.6          | 6.5      | 1.6     |
| Anteil Kälte an Heizwärmebedarf |                    | 34%          | 58%      | 1%      |

Tabelle 2: Jährlicher Heizwärmebedarf und Klimakältebedarf für die Nutzung Wohnen MFH gemäss SIA 2024:2015

Es ist wiederum ersichtlich, dass auch seitens Energie die Heizung einen höheren Bedarf generiert.

Aus den Vergleichen mit den Werten der SIA 2024:2015 lässt sich zusammenfassend sagen, dass sowohl aus Sicht der Leistung wie auch aus Sicht der Energie die Heizung höher liegt. Zudem ist noch zu erwähnen, dass bei dieser Betrachtung der Brauchwarmwasserbedarf nicht miteinbezogen wurde. Folglich wird bei einer Brauchwarmwassererzeugung mittels Erdwärmesonden-Wärmepumpe die Entzugsenergie (ggf. auch -Leistung) aus dem Erdreich zunehmend sein.

## 2.2 Regeneration der Erdwärmesonde bei unterschiedlichen Jahresarbeitszahlen / ESEER

Während der Heizperiode wird über die Erdwärmesonde dem Erdreich Wärme entzogen. Diese wird anschliessend über eine Wärmepumpe auf ein höheres, nutzbares Temperaturniveau gebracht und kann so zu Heizzwecken genutzt werden. Das heisst, der Wärmebedarf im Raum setzt sich je nach Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe aus einem Anteil an Erdwärme und einen elektrischen Anteil zusammen:

### **Heizwärmebedarf = Wärme aus der EWS + elektrische Antriebsenergie WP**

Aus Sicht der Erdwärmesonde kann also gesagt werden, dass bei einer hohen Jahresarbeitszahl (= weniger elektrische Antriebsenergie WP) der Wärmebezug aus dem Erdreich höher ist:

### **Wärme aus der EWS = Heizwärmebedarf - elektrische Antriebsenergie WP**

Bei einer Regeneration des Erdreiches über eine aktive Kühlung mittels reversibler Wärmepumpe setzt sich die dem Erdreich zugeführte Energie aus dem Klimakältebedarf und wiederum einem elektrischen Teil zusammen. Der elektrische Anteil der Wärmepumpe (in diesem Fall Kältemaschine) ist abhängig vom ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio). Ein hoher ESEER (= weniger elektrische Antriebsenergie KM) reduziert den Wärmeeintrag in das Erdreich.

### **Regeneration der EWS = Klimakältebedarf + elektrischer Anteil WP**

Die nachfolgenden Tabellen zeigen auf, wie sich die Bilanz der Erdwärmesonde bei verschiedenen Jahresarbeitszahlen bzw. ESEER verhält.

Die Jahresarbeitszahl und der ESEER sind von den verschiedenen Leistungsstufen (unterschiedliche Effizienz bei verschiedenen Betriebspunkten) und deren Betriebsstunden abhängig. Wenn bei einer Erdwärmesonden- Wärmepumpe eine Jahresarbeitszahl angenommen wird, lässt sich daraus keine pauschale Aussage zum ESEER machen. Fakt ist, dass der COP einer Kompressionsmaschine seitens Kühlung immer um den Wert 1 kleiner ist, als bei der Heizungsanwendung. Jedoch ist davon auszugehen, dass die reversibel Wärmepumpe während dem Kühlbetrieb eher im unteren Teillastbereich arbeitet. Je nach Verdichter der reversiblen Wärmepumpe kann die Effizienz im genannten Teillastbereich höher sein als bei Volllast. Dieser Effekt spricht sich wieder für einen höheren ESEER aus. Aus diesen Gründen wird bei den nachfolgenden Berechnungen jeweils von identischen JAZ / ESEER ausgegangen.

|                                       |                    | Standardwert | Zielwert | Bestand |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|----------|---------|
| jährlicher Heizwärmebedarf            | kWh/m <sup>2</sup> | 19.4         | 11.2     | 112.9   |
| Anteil Entzug EWS                     | kWh/m <sup>2</sup> | 12.9         | 7.5      | 75.3    |
| Anteil elektrische Antriebsenergie WP | kWh/m <sup>2</sup> | 6.5          | 3.7      | 37.6    |
|                                       |                    |              |          |         |
| jährlicher Klimakältebedarf           | kWh/m <sup>2</sup> | 6.6          | 6.5      | 1.6     |
| Anteil Regeneration EWS               | kWh/m <sup>2</sup> | 9.9          | 9.8      | 2.4     |
| Anteil elektrische Antriebsenergie KM | kWh/m <sup>2</sup> | 3.3          | 3.3      | 0.8     |
|                                       |                    |              |          |         |
| Bilanz EWS: Regeneration - Entzug     | kWh/m <sup>2</sup> | -3           | 2.3      | -72.9   |

Tabelle 3: Bilanz Erdwärmesonde: JAZ = 3, ESEER = 3

|                                       |                    | Standardwert | Zielwert | Bestand |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|----------|---------|
| jährlicher Heizwärmebedarf            | kWh/m <sup>2</sup> | 19.4         | 11.2     | 112.9   |
| Anteil Entzug EWS                     | kWh/m <sup>2</sup> | 14.6         | 8.4      | 84.7    |
| Anteil elektrische Antriebsenergie WP | kWh/m <sup>2</sup> | 4.9          | 2.8      | 28.2    |
|                                       |                    |              |          |         |
| jährlicher Klimakältebedarf           | kWh/m <sup>2</sup> | 6.6          | 6.5      | 1.6     |
| Anteil Regeneration EWS               | kWh/m <sup>2</sup> | 8.8          | 8.7      | 2.1     |
| Anteil elektrische Antriebsenergie KM | kWh/m <sup>2</sup> | 2.2          | 2.2      | 0.5     |
|                                       |                    |              |          |         |
| Bilanz EWS: Regeneration - Entzug     | kWh/m <sup>2</sup> | -5.8         | 0.3      | -82.6   |

Tabelle 4: Bilanz Erdwärmesonde: JAZ = 4, ESEER = 4

|                                       |                    | Standardwert | Zielwert | Bestand |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|----------|---------|
| jährlicher Heizwärmebedarf            | kWh/m <sup>2</sup> | 19.4         | 11.2     | 112.9   |
| Anteil Entzug EWS                     | kWh/m <sup>2</sup> | 15.5         | 9.0      | 90.3    |
| Anteil elektrische Antriebsenergie WP | kWh/m <sup>2</sup> | 3.9          | 2.2      | 22.6    |
|                                       |                    |              |          |         |
| jährlicher Klimakältebedarf           | kWh/m <sup>2</sup> | 6.6          | 6.5      | 1.6     |
| Anteil Regeneration EWS               | kWh/m <sup>2</sup> | 8.3          | 8.1      | 2.0     |
| Anteil elektrische Antriebsenergie KM | kWh/m <sup>2</sup> | 1.7          | 1.6      | 0.4     |
|                                       |                    |              |          |         |
| Bilanz EWS: Regeneration - Entzug     | kWh/m <sup>2</sup> | -7.2         | -0.9     | -88.3   |

Tabelle 5: Bilanz Erdwärmesonde: JAZ = 5, ESEER = 5

Die Bilanzen zeigen auf, dass bei einer zunehmenden Effizienz im Heiz- sowie Kühlfall der reversiblen Wärmepumpe die Erdwärmesonde zunehmend ausgekühlt wird. Einzig bei den Zielwerten und den JAZ / ESEER unterhalb von 4 kann von einer ausreichenden Regeneration ausgegangen werden.

Wird die gleiche Berechnung für eine Erdwärmesonde mit Geocooling gemacht, so fällt beim Regenerieren der elektrische Anteil der reversiblen Wärmepumpe weg. Entsprechend wird durch reines Geocooling das Erdreich weniger stark regeneriert. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass die höhere Regeneration dank der reversiblen Wärmepumpe allein auf den elektrischen

Strombedarf zurückzuführen ist. Besteht bei einem expliziten Fall also ein hoher Bedarf an Regeneration, ist es energetisch nicht sinnvoll deshalb absichtlich eine reversible Wärmepumpe zu betreiben. Sinnvoller wäre nebst dem Geocooling der Einsatz von Solarthermie.

## 2.3 Berechnung des Heiz- / Kühlbedarf mittels SIA-TEC-Tool für ein Mehrfamilienhaus

Das SIA-TEC-Tool ermöglicht eine raumweise stündliche Berechnung und Optimierung des Energie- und Leistungsbedarf von klimatisierten Gebäuden für Heizung, Lüftung, Klima, Beleuchtung und Betriebseinrichtungen. Um den Einfluss auf den thermischen Komfort zu untersuchen, wurde im SIA-TEC-Tool ein Mehrfamilienhaus (sechs Einheiten im Minergie-Standard, Detail siehe Anhang) mit den folgenden drei Erdwärmesonden-Wärmepumpen simuliert:

### Variante 1: Keine Kühlung

- Wärmeerzeugung mittels Erdwärmesonden-Wärmepumpe
- keine Kühlung
- Wärmeabgabe über Fussbodenheizung

### Variante 2: Kühlung direkt über EWS (Geocooling)

- Wärmeerzeugung mittels Erdwärmesonden-Wärmepumpe
- Kühlung direkt mittels Erdwärmesonde (ohne reversible Wärmepumpe)
- Wärme- und Kälteabgabe<sup>1</sup> über Fussbodenheizung (Heizbetrieb 40W/m<sup>2</sup> / Kühlbetrieb 25W/m<sup>2</sup>)

### Variante 3: Kühlung mit reversibler Wärmepumpe

- Wärmeerzeugung mittels Erdwärmesonden-Wärmepumpe
- Kühlung mittels Kältemaschine (reversible Wärmepumpe wurde durch Kältemaschine substituiert, da das Programm keine reversible Wärmepumpe abbilden kann)
- Wärme- und Kälteabgabe über Fussbodenheizung (Heizbetrieb 40W/m<sup>2</sup> / Kühlbetrieb 25W/m<sup>2</sup>)

Die Abgabeleistungen und Systemtemperaturen der Erdwärmesonde wurden nicht berechnet/simuliert.

---

<sup>1</sup> Gemäss Schlussbericht Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen des BFE, liegt die spezifische Abgabeleistung der Fussbodenheizung bei der Kühlung zwischen 20-30 W/m<sup>2</sup>.

## 2.4 Resultate der Berechnungen

Um einen allfälligen Mehrnutzen hinsichtlich des thermischen Komforts eines bestimmten Systems ausweisen zu können, werden folgende vier Parameter verglichen:

1. minimale Raumtemperatur
2. Anzahl Stunden Untertemperatur pro Jahr
3. maximal Raumtemperatur
4. Anzahl Stunden Übertemperatur pro Jahr

In der nachfolgenden Tabelle sind die Resultate der drei Varianten gegenübergestellt.

|   | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 |
|---|------------|------------|------------|
| minimale Raumtemperatur                 | 20.02 °C   | 20.02 °C   | 20.02 °C   |
| Anzahl Stunden Untertemperatur pro Jahr | 24 h       | 24 h       | 24 h       |
| maximal Raumtemperatur                  | 36.8 °C    | 28.9 °C    | 28.9 °C    |
| Anzahl Stunden Übertemperatur pro Jahr  | 5311 h     | 221 h      | 221 h      |

**Tabelle 6: Resultate aus dem SIA-TEC-Tool, MFH mit sechs Einheiten im Minergie Standard**

Die Variante 1 weist keine Raumkühlung auf und hat entsprechend eine hohe Anzahl an Übertemperaturstunden. Das Geocooling direkt über die Erdwärmesonde der Variante 2 und das aktive Kühlen mit der reversiblen Wärmepumpe der Variante 3 führen dazu, dass bei Bedarf der Raum gekühlt werden kann. Durch die reversible Wärmepumpe sind theoretisch höhere Kälteleistungen möglich als beim Geocooling. Jedoch wird die effektive Raumkühlung durch das Kälteabgabesystem bestimmt. Da das Geocooling bereits ausreicht, um die über die Fussbodenheizung definierte, maximale Kälteleistung zu erbringen, bringt die zusätzliche Leistung seitens Kälteerzeuger keinen Mehrwert bezüglich des thermischen Komforts. Das erklärt auch, warum die maximale Raumtemperatur und die Anzahl Stunden Übertemperatur bei der Variante 2 und 3 identisch sind.

Die maximale Kälteabgabeleistung einer Fussbodenheizung wird auch aufgrund einer minimal zulässigen Vorlauftemperatur während dem Kühlfall eingeschränkt. Diese sollte aus Komfortgründen und zur Verhinderung von Kondenswasser nicht zu tief sein. Letzteres kann durch einen hohen Feuchtegehalt im Innenraum und kalten Oberflächen (beispielsweise aktiv gekühlter Fussboden) entstehen. Die relative Luftfeuchte der Raumluft wird nebst internen Feuchtequellen (Kochen, Duschen, aufgehängte Wäsche, etc.) auch von der relativen Luftfeuchte der Aussenluft bestimmt.

Zusammenfassend kann seitens thermischen Komforts gesagt werden, dass wenn durch Geocooling die maximal zulässige Kälteleistung des Abgabesystems erreicht wird, eine reversible Wärmepumpe keinen Mehrwert bringt.

### **3 Chancen und Risiken Abgabesysteme**

Bei der Kühlung kann es Grundsätzlich zu Kondensat Anfall kommen. Die unterschiedlichen Aussenluft/Raumluftbedingungen in einem Wohngebäude stellen bezüglich Kondensat ein Risiko dar. Damit dieses Risiko möglichst klein gehalten werden kann, muss die Oberflächentemperatur der Kühlfläche möglichst hoch gehalten werden.

Um möglichst viel Leistung in den Raum abgeben zu können, sollte eine grosse Abgabefläche wie z.B. Fussbodenheizung oder TABS (Thermoaktives Bauteilsystem) eingesetzt werden. Bei einer Abgabe über Heizkörper müssen die Temperaturen (wegen des Kondensat Risikos) so hoch gewählt werden, dass die Leistungsabgabe massiv abnimmt.

Bei einer aktiven Kühlung über eine reversible Wärmepumpe muss darauf geachtet werden, dass die Abgabeleistung im Raum die erhöhte Kühlleistung der Erdwärmesonde abdecken kann.