Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 68 (1977)

Heft: 4

Artikel: Die Anwendung der Wärmepumpe zur Heizung von Wohnbauten mit Wärmeentnahme aus dem Erdreich

Autor: Schär, O.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914994

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'évaporateur est équipé de résistances de chauffage (6 kW) qui sont enclenchées périodiquement pendant quelques minutes lors de températures inférieures à 3 °C pour faire fondre la glace qui s'est déposée sur le corps de l'échangeur. Le compresseur est arrêté lorsque ce chauffage fonctionne.

Les mesures de rendement de la pompe à chaleur ont pu commencer en avril 1976. Du 10 au 30 avril, la température de l'air extérieur s'est située entre 1,8 et 13,3 °C. Le compresseur a fonctionné durant 84 heures, et il a consommé 388 kWh. Durant cette même période, le ventilateur de l'évaporateur consommait 87 kWh. En considérant l'énergie apportée aux locaux pendant cette même période, on obtient un coefficient de performance de la pompe à chaleur de 2,5. Il faut préciser que l'eau chaude sanitaire est fournie par un accumulateur électrique.

Le bruit du compresseur est comparable à celui d'un congélateur. Du côté de l'évaporateur, certaines améliorations sont encore possibles comme l'installation d'un dispositif simple qui détecte la formation de glace.

3. Conclusions

Le chauffage des locaux anciens par pompe à chaleur est techniquement possible sous forme de chauffage bivalent. Des mesures pendant plusieurs périodes de chauffage sont nécessaires pour juger le système au point de vue économique. On peut pourtant déjà dire que le chauffage des locaux anciens par pompe à chaleur est intéressant lors du remplacement d'une citerne à mazout enterrée. D'une part, on évite l'occupation d'un important volume pour une nouvelle citerne à l'intérieur puisque une petite citerne pour l'appoint suffit (par ex. en matières synthétiques), et d'autre part les frais de réparations couvrent pratiquement l'investissement de la pompe à chaleur. De plus, la transformation du chauffage à mazout en chauffage électrique direct ou par accumulation pose souvent des problèmes de puissance de raccordement et de frais d'exploitation. L'installation d'une pompe à chaleur supprime ces inconvénients.

Adresse de l'auteur
R. Clément, Entreprises Electriques Fribourgeoises,
Pérolles 25, 1700 Fribourg.

Die Anwendung der Wärmepumpe zur Heizung von Wohnbauten mit Wärmeentnahme aus dem Erdreich [1])

Von O. Schär

621.577

Die Wärmepumpe mit Wärmeentnahme aus dem Erdreich bietet die Möglichkeit zur Heizung von kleineren Wohnbauten. Die Berechnung einer entsprechenden Wärmepumpe mit zugehörigem Pufferspeicher wird kurz dargelegt. Das thermische Verhalten des Erdreiches bei Wärmeentnahme wird untersucht und es wird über Messungen berichtet.

Les pompes à chaleur utilisant le sol comme source thermique offrent la possibilité de chauffer de petites habitations. Le dimensionnement d'une pompe à chaleur appropriée avec accumulateur-tampon fait l'objet d'une brève présentation. Le comportement thermique du sol lors des prélèvements de chaleur est soumis à une analyse, et certains résultats d'essais sont communiqués.

1. Dimensionierung der Wärmepumpe

Die Leistungsziffer ε, d.h. das Verhältnis der am Verflüssiger einer Wärmepumpe abgegebenen zu der vom Verdichter aufgenommenen Energie, ist eine der wichtigsten Grössen für den Betrieb einer Wärmepumpenanlage. Mit der Verflüssigungstemperatur T_K, der Verdampfungstemperatur T_V (beide in K) und dem Wirkungsgrad der Anlage η kann ε nach der Beziehung

$$\varepsilon = \frac{T_K \cdot \eta}{T_K - T_V} \qquad (1)$$

berechnet werden. Der Wirkungsgrad einer Wärmepumpenanlage zur Heizung kleinerer Wohnbauten liegt etwa bei 0,4.

Wenn man annimmt, dass die mittlere Verflüssigungstemperatur während einer Heizperiode 318 K (45 °C) und die mittlere Verdampfungstemperatur 276 K (3 °C) betragen, ergibt sich eine mittlere Leistungsziffer von $\varepsilon_m = 3$. Diese entspricht etwa einer Wärmepumpenheizung ohne Zusatzheizung in der Klimazone II, bei Wärmeentnahme aus dem Erdreich, bei Betrieb einer grossflächigen Konvektoren- oder einer Fussbodenheizung.

[1]) Auszug aus einem Bericht, der dem Kongress der Union Internationale d'Electrothermie in Lüttich 1976 vorgelegt wurde.

Während der kältesten Tage ist mit Verdampfungstemperaturen von rund 255 K (– 18 °C) und mit Verflüssigungstemperaturen von rund 333 K (60 °C) zu rechnen. Daraus ergibt sich theoretisch eine minimale Leistungsziffer von $\varepsilon_{min} = 1{,}7$. In Wirklichkeit beträgt die minimale Leistungsziffer etwa $\varepsilon_{min} = 2$, da der Wirkungsgrad η zunimmt.

Ein Einfamilienhaus in der Klimazone II mit einem Wärmeleistungsbedarf $Q_h = 15$ kW benötigt also im Direktheizungsbetrieb eine Aufnahmeleistung des Verdichtermotors von

$$P_d = Q_h/\varepsilon_{min} = 7{,}5 \text{ kW} \qquad (2)$$

Die Leistungsersparnis gegenüber einer entsprechenden Widerstands-Nachtspeicherheizung mit z.B. 8stündiger Nachtaufladung und $15^1/_2$stündiger Tagnachladung, die theoretisch eine Leistung von 10,2 kW aufweisen würde, ist nicht sehr gross. Durch Speicherung der Wärme kann die Anschlussleistung der Wärmepumpe ebenfalls verkleinert werden.

Für das Einfamilienhaus $Q_h = 15$ kW beträgt der maximale tägliche Energieverbrauch etwa $Q_d = 16 \cdot Q_h = 240$ kWh. Wenn die tägliche Energiefreigabezeit t_H total 23,5 h beträgt, ergibt sich für die Aufnahmeleistung des Verdichtermotors während der kältesten Tage

$$P_{min} = Q_d/t_H \cdot \varepsilon_{min} = 5{,}1 \text{ kW} \qquad (3)$$

Mit abnehmender Differenz zwischen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur des Kältemittels im Wärmepumpenkreis steigt die Leistungsziffer und aufgrund der Betriebscharakteristik der Wärmepumpe die Aufnahmeleistung des Verdichtermotors. Während wärmerer Tage weist daher eine Wärmepumpenheizung wesentlich günstigere Wärmeleistungsverhältnisse auf als während kälterer Tage.

2. Speichergrösse

Während der Nachtstunden ist der Energiebedarf der zu heizenden Räume verhältnismässig gering. Die grösste Leistung tritt in den frühen Vormittagsstunden auf. Anschliessend sinkt die verlangte Wärmeleistung langsam ab und bleibt vom späten Nachmittag an unter dem maximalen Wärmeleistungsbedarf. Zur Bestimmung der Speichergrösse ist es notwendig, den Wärmeverbrauch und die Wärmeerzeugung der Wärmepumpenanlage über einen Heiztag zu kumulieren. Die grösste Differenz zwischen kumulierter erzeugter Wärme und kumuliertem Wärmeverbrauch ergibt die erforderliche Kapazität des Speichers bei der der Berechnung zugrunde gelegten Aussentemperatur.

Fast ausnahmslos ergibt sich, dass der Wert von W_{sp} am grössten ist nach Beendigung der Nachtaufladung, an Tagen, an denen während der Nacht kein Wärmeverbrauch auftritt und die Nachtladung gerade für den ganzen Tag ausreichen muss.

Für das Einfamilienhaus mit $Q_h = 15$ kW folgt bei ungefähr konstanter Wärmeleistung des Verflüssigers für diese Wärmeleistung $P_K = \varepsilon_{min} \cdot P_{min} = 10{,}2$ kW. Die Niedertariffzeit während der Nacht betrage $t_n = 8$ h, woraus die Speicherkapazität $W_{sp} = P_K \cdot t_n = 81{,}6$ kWh resultiert. Das entsprechende Speichervolumen liegt bei 5000 l.

Durch die Zurverfügungstellung der Energie während $23\,^1/_2$ h pro Tag und die Speicherung der erzeugten Wärme kann die Anschlussleistung der Wärmepumpe klein gehalten werden. Die Speicherung erlaubt ferner, den Energiebezug vorwiegend auf die Nacht zu verlagern. Hält man über dem ganzen Aussentemperaturbereich die Abgabeleistung des Verflüssigers annähernd konstant, so wird, bei einer Niedertariffzeit von 8 h pro Tag, das Verhältnis Nieder- zu Hochtarifenergiebezug während einer Heizsaison durchschnittlicher klimatischer Verhältnisse rund 70:30 betragen. Bei Steuerung der Wärmepumpe auf konstante Aufnahmeleistung des Verdichtermotors muss ein etwas grösserer Speicher installiert werden, das Verhältnis Nieder- zu Hochtarifenergiebezug kann aber bis auf 85:15 oder mehr verbessert werden.

3. Das Erdreich als Wärmequelle

Die spezifische Wärme des Erdreiches liegt in der Grössenordnung von 0,25 Wh/kg °C. Soll ein Gebäude mit der thermischen Verlustleistung von $Q_h = 15$ kW während eines strengen Winters geheizt werden, so benötigt man rund 25000 kWh. Bei Annahme einer mittleren Leistungsziffer der Wärmepumpe von $\varepsilon_m = 3$, und bei einer Abkühlung des Erdreiches von 10 °C auf − 10 °C, ohne Zufuhr von Wärme, würde hierzu ein Erdvolumen von 2000 m³ notwendig, ein Erdwürfel von 12,6 m Kantenlänge. Die thermische Erschliessung dieses Erdwürfels würde Fr. 60000.– bis 70000.– kosten. Eine Wärmepumpenheizung nach diesem System, bestehend aus erschlossenem Erdreich, Wärmepumpe und Sommernachwärmevorrichtung für das Erdreich, kostete gegen Fr. 90000.–.

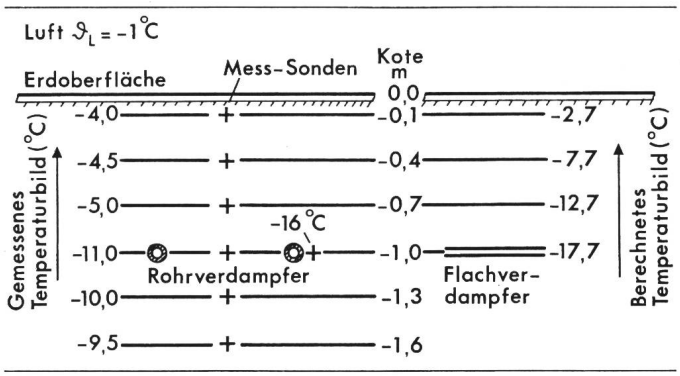

Fig. 1 Vergleich berechneter und gemessener Temperaturverteilung bei Wärmeentnahme aus dem Erdreich
Mittelwert der Wärmeentnahmeleistung 4 kW/160 m²

Ein solcher Erdwürfel, bis auf − 10 °C abgekühlt, würde sich ohne Nachwärmung während des Sommers thermisch nicht mehr erholen. Versuche haben gezeigt, dass bei mittleren klimatischen Verhältnissen, wenn Anfang Mai das gekühlte Erdreich in 1,8 m Tiefe − 10 °C aufwies, es sich bis Ende Juni auf etwas über 0 °C erholte.

Wie klein der Wärmenachfluss aus dem Erdinnern nach der Erdoberfläche ist, sei anhand der folgenden Berechnung gezeigt. Der Wärmefluss q_{th} berechnet sich nach der Beziehung

$$q_{th} = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta\vartheta}{d} \tag{4}$$

wobei λ die Wärmeleitzahl des Materials, $\Delta\vartheta$ die Temperaturdifferenz, A den Querschnitt und d die Dicke des Materials bedeutet. Bindiges, naturfeuchtes Erdreich hat im Mittel eine Wärmeleitzahl λ von 1,5 W/m °C. Wenn die obersten Schichten des Erdreiches eine mittlere Jahrestemperatur von 9 °C aufweisen, herrscht in 30 m Tiefe eine Erdreichtemperatur von ca. 10 °C. Wird die oberste Schicht des Erdreiches auf − 10 °C abgekühlt, wobei diese Abkühlung längere Zeit andauert, so erfolgt vom Erdinnern an die Erdoberfläche im Maximum ein Wärmefluss von ca. 1 W/m².

Die Berechnung zeigt, dass für den Wärmenachfluss in abgekühltes Erdreich der Wärmefluss aus dem Erdinnern ausser Betracht fällt. Die zur Raumheizung dem Erdreich entnommene Wärme muss von oben nachgeschoben werden. Sie wird von der direkten und diffusen Sonneneinstrahlung, vom Regenwasser und von der Luft eingebracht.

Ein Stück Erde von 1 m² hat als Folge der Rauheit der Oberfläche eine effektive Fläche von mindestens 3 m². Diese Tatsache, gepaart mit der dunklen Farbe der Erde, hat zur Folge, dass das Wärmeabsorptionsvermögen der Erdoberfläche fast demjenigen einer ideal schwarzen Fläche entspricht. Im weitern begünstigt die Oberflächenrauheit die Wärmeübertragung von der Luft auf das Erdreich und umgekehrt. Der Wärmeübergangswiderstand Luft–Erdreich ist daher für die Berechnungen vernachlässigbar.

Aus Gl. (4) kann bei gegebenem Grundstück, gegebener Tiefenlage des grossflächigen Verdampfers und gegebener Wärmeentnahmeleistung die Differenz zwischen Aussenluft- und Verdampfungstemperatur berechnet werden. Für das Einfamilienhaus mit $Q_h = 15$ kW, Leistungsziffer $\varepsilon_{min} = 2$, einer Tiefe des Verdampfers von 0,35 m und einer Aufnahmeleistung des Verdichtermotors von 5,1 kW ergibt sich bei einer mittleren Aussentemperatur von − 15 °C und einem Grundstück von 300 m² eine Temperaturdifferenz Aussenluft–Verdampfer

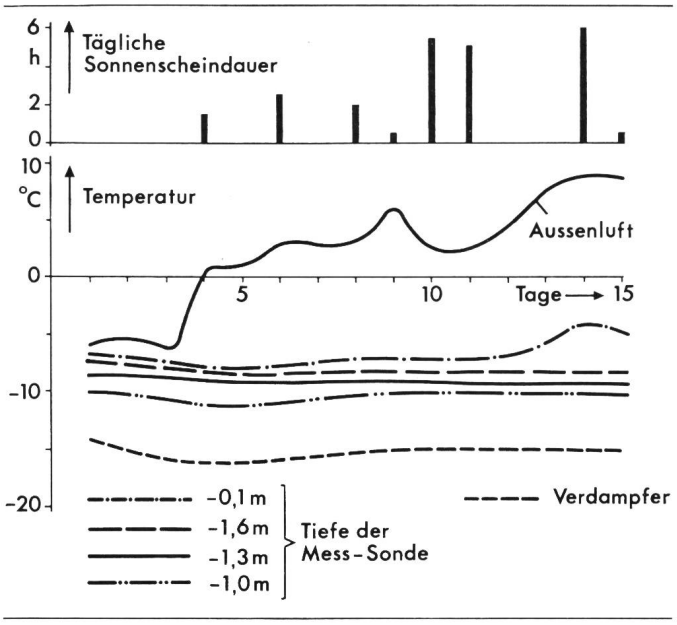

Fig. 2 Wärmeentnahme aus dem Erdreich, Luft und Bodentemperatur
Verdampfertiefe 1 m

von rund $\Delta\vartheta_e = 4\ ^0C$. Die Verdampfungstemperatur würde bei den angenommenen Verhältnissen $T_V = 254$ K betragen.

Zur Überprüfung der theoretischen Aussagen wurden an einem mit einer Wärmepumpenheizung ausgerüsteten Einfamilienhaus Messungen durchgeführt. Hierzu wurde nicht ein Grossflächenverdampfer verwendet, sondern ein Verdampfer aus Kupferrohren von rund 25 mm ⌀ und 1 m Rohrabstand. Die Rohre sind rund 1 m tief im Boden verlegt. Fig. 1 zeigt die gemessenen und die berechneten Werte der Temperaturen im Erdreich. Je tiefer die Rohre eingegraben sind, desto grösser ist der thermische Widerstand zwischen Erdoberfläche und Verdampferrohren und desto niedriger die Verdampfungstemperatur, was sich ungünstig auf die Leistungsziffer auswirkt. Da die spezifische Speicherfähigkeit des Erdreiches verhältnismässig klein ist, man also für den Betrieb einer Wärmepumpe zu Raumheizzwecken wenig mit der Erdspeicherung rechnen kann, ist es zweckmässig, Verdampferrohre nur etwas mehr als Spatenstichtiefe im Erdreich zu verlegen.

4. Die Wirkung von Frost und Schnee

Bei den erwähnten Versuchen wurde auch untersucht, wie sich der thermische Widerstand im gefrorenen Erdreich verhält. Es handelt sich um naturfeuchtes, bindiges Erdreich. Dasselbe wurde stellenweise bis auf $-12\ ^0C$ abgekühlt. Eine messbare Veränderung des thermischen Widerstandes konnte nicht festgestellt werden.

Eine zweite wichtige Feststellung in bezug auf die Frosterscheinungen konnte gemacht werden. Das von der Luft auf die gefrorene Erdoberfläche ausgeschiedene Wasser diffundiert leicht in die oberste Erdschicht, bevor es gefriert. Es bildet sich demnach bei kälterem Wetter über der Erdoberfläche keine den Wärmeübergang Luft–Erdreich möglicherweise beeinträchtigende kompakte Eisschicht.

Schnee besteht aus glasklaren Kristallen, welche die Oberfläche einer Schneeschicht aufrauhen und, analog dem Erdreich, die gemessene Oberfläche auf mindestens das Dreifache vergrössern. Die kurzwellige Strahlung wird reflektiert, während die Infrarotstrahlung als Folge der mehrfachen Brechung an der Oberfläche stark absorbiert wird. Im Infrarotbereich erreichen Absorption und Strahlung nahezu die Werte der schwarzen Fläche. Die Wärmeleitfähigkeit des Schnees liegt zwischen etwa 0,1 und 1,4 W/m °C.

Wenn im Beispiel des Einfamilienhauses mit $Q_h = 15$ kW während der kältesten Tage eine kompakte Schneeschicht von 10 cm Dicke auf der Erdoberfläche liegt, wird der Temperaturabfall Luft–Verdampfer vergrössert. Schnee mit einem spezifischen Gewicht von 500 kg/m³ hat eine Wärmeleitzahl von rund 1 W/m °C. Wenn man nach Gl. (4) den Temperaturabfall im Schnee und im Erdreich bei einer Wärmeleistung von 5,1 kW ermittelt, erhält man $\Delta\vartheta_e = 5{,}7\ ^0C$ im Vergleich zu $\Delta\vartheta_e = 4\ ^0C$ ohne Schnee.

5. Versuchsanordnung und weitere Resultate

Seit mehr als drei Jahren läuft ein Versuch mit einer Wärmepumpenheizung mit Wärmeentnahme aus dem Erdreich. Die Anlage, in einem Einfamilienhaus in der Grösse desjenigen des berechneten Beispieles, bezieht die Wärme aus einem Grundstück von rund 250 m². Die Verdampferrohre aus Kupfer, mit einem Durchmesser von rund 25 mm, sind in Tiefen von 0,8...1,5 m, mit seitlichen Abständen von 1 m verlegt. Die totale Verdampferrohrlänge beträgt 235 m. Das beanspruchte Erdreich ist mit mehreren Temperatursonden bestückt. Es werden aber auch Regenmenge, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer gemessen. An der Wärmepumpe selbst werden die Betriebszeit, die aufgenommene Leistung und Energie sowie die abgegebene Wärme und die Verflüssigertemperatur gemessen. Die Aufmerksamkeit wurde bisher hauptsächlich dem Erdreich und dessen Beeinflussung durch den Wärmeentzug einerseits und die Witterungseinwirkung anderseits gewidmet.

Die Messungen bestätigen die Annahmen und Vorausberechnungen in bezug auf das thermische Verhalten des Erdreiches und der Wärmezufuhr. Allerdings fehlen noch Messungen bei sehr tiefen Temperaturen infolge der drei relativ milden vergangenen Winter. Zur Illustration der Versuchsergebnisse sind in Fig. 2 Temperaturkurven in Erdreich und Luft während einer kurzen Messdauer angegeben.

Anlässlich der Versuche konnte festgestellt werden, dass die Windgeschwindigkeit und die Luftfeuchtigkeit zur thermischen Beeinflussung des Erdbodens keinen messbaren Beitrag leisten. Einzig die Lufttemperatur, die Regenwassertemperatur und die Sonnenscheindauer sind massgebend für die Wärmebilanz des Erdreiches.

Adresse des Autors
Otto Schär, El.-Ing. HTL, Bernische Kraftwerke AG, 3000 Bern 25.