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: 8

Artikel: Probleme einer Luft-Wasser-Wärmepumpe bei tiefen Aussentemperaturen

Autor: Michels, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915021

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

Probleme einer Luft-Wasser-Wärmepumpe bei tiefen Aussentemperaturen

Von F. Michels

621.577

Als Wärmequelle für die Wärmepumpe kommt sehr oft nur die Aussenluft in Frage. Bei tiefer Temperatur zeigt die Wärmepumpe jedoch ungünstiges Verhalten. Mit einer zweistufigen Pumpe lässt sich dieser Nachteil beheben.

L'atmosphère est souvent la seule source de chaleur qui entre en ligne de compte pour la pompe à chaleur. A basse température, la pompe présente toutefois un comportement défavorable. Cet inconvénient peut être supprimé en ayant recours à une pompe à deux étages.

1. Einleitung

Mit den Problemen der Energieversorgung und den zahlreichen Lösungsvorschlägen ist auch die Wärmepumpe als Heizmaschine wieder zu Ehren gekommen. Sie stellt vor allem im Bereich der Haustechnik eine ernstzunehmende Alternative zur konventionellen Heizungstechnik dar. Von fundamentaler Bedeutung ist in der Wärmepumpentechnik die Frage nach der Wärmequelle. Entscheidend für den Erfolg der Wärmepumpentechnik ist ferner das Verhalten bei tiefen Temperaturen der Wärmequelle. Auf diese Probleme soll im folgenden näher eingegangen werden.

2. Wärmequellen

Die Forderungen, die an ein Medium gestellt werden, das als Wärmequelle in Betracht gezogen wird, sind

a) hohe spezifische Wärme,
b) möglichst konstante Temperatur während der Heizperiode und
c) gute Verfügbarkeit.

Die Bedingungen a und b werden in nahezu idealer Weise von Wasser erfüllt. Wasser hat eine hohe spezifische Wärme, und die Flüsse und Seen in unseren Breiten gefrieren nur äusserst selten. Beachtet man noch, dass Wasser auch als Grundwasser im Boden vorkommt und dort viel konstantere Temperaturen aufweist, so scheint das Wasser als Wärmequelle für die Wärmepumpe geradezu ideal. Leider erfüllt Wasser die Forderung c nur selten. Es steht nur demjenigen zur Verfügung, der auch wirklich an einem Bach, Fluss oder See wohnt, oder dem das Gewässerschutzamt gestattet, den Grundwasserstrom anzuzapfen. Erfahrungsgemäss sind solche Bewilligungen eher selten.

Eine Wärmequelle, die ebenfalls die Bedingung a recht gut erfüllt, ist das Erdreich. Je nach Art und Wassergehalt des Bodens ist die spezifische Wärme recht hoch. Dagegen treten bei längerer Wärmeentnahme aus dem Boden wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit Gefrierungserscheinungen auf und damit verbunden eine Verschlechterung der Wärmeübergangswerte am Wärmeaustauscher. Die Folgen sind schlechte Leistungsziffer der Anlage und Vegetationsverzögerungen im Frühling. Punkt b wird also nur unvollkommen erfüllt. Ebenfalls ist die Verfügbarkeit dieser Wärmequelle nicht immer gegeben, denn für einen Erdreichkollektor werden recht grosse Bodenflächen verlangt.

Die nächste Wärmequelle, die sich für den Wärmepumpenprozess anbietet, ist die Lufthülle der Erde. Auf den ersten Blick erscheint sie als denkbar ungeeignet. Die spezifische Wärme ist rund 4mal kleiner als diejenige von Wasser, und die Temperatur schwankt in weiten Grenzen. Dazu wird bei der Wärmeaufnahme aus der Luft sehr häufig der Taupunkt unterschritten, was bei Temperaturen unter null Grad zu Eisbildung am Luftkühler und damit zu zusätzlichen Problemen führt. Luft als Wärmequelle hat aber einen gewaltigen Vorteil: sie steht immer und überall zur Verfügung. Bei näherer Betrachtung der aufgestellten Kriterien erweist sich die Verfügbarkeit der Wärmequelle in sehr vielen Fällen als tatsächlich entscheidend. Diese Überlegungen führten denn auch bald einmal zu Wärmepumpen, die Luft als Wärmequelle verwenden.

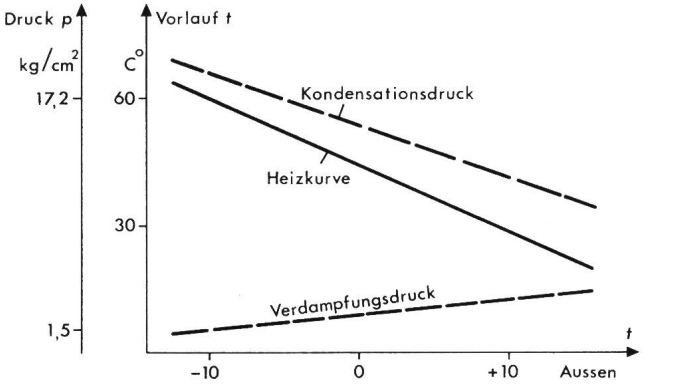

Fig. 1 Vorlauftemperatur der Heizung sowie Kondensations- und Verdampfungsdruck im Luftkühler in Abhängigkeit der Aussentemperatur

3. Verhalten des Kompressors bei tiefen Aussentemperaturen

Für jedes Heizsystem, sei es Öl-, Elektro-, Gas- oder Wärmepumpenheizung, besteht die Forderung, dass mit sinkender Aussentemperatur die Vorlauftemperatur für die Heizkörper steigt, so dass die Heizleistung automatisch dem erhöhten Wärmebedarf des Gebäudes angepasst wird. Das bedeutet also für das Heizsystem variable Wassertemperaturen am Ein- und Austritt. Für die Wärmepumpe hat dies zur Folge, dass mit der Wassertemperatur auch der Kondensationsdruck variiert.

Wird Luft als Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet, so bedeutet dies, dass parallel zu einer Veränderung der Lufttemperatur eine Veränderung des Verdampfungsdruckes im Luftkühler erfolgt. Fig. 1 zeigt den beschriebenen Zusammenhang. Über der Aussentemperatur ist einmal die Heizgerade aufgetragen. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen Vorlauf- und Aussentemperatur. Überlagert ist der zugehörige Verdampfungs- und Kondensationsdruck eingezeichnet, wie sie sich bei den jeweiligen Aussentemperaturen im Wärmepumpensystem einstellen. Mit abnehmender Aussentemperatur wächst die Differenz zwischen Kondensations- und Verdampfungsdruck.

Die Auswirkungen auf den Kompressor stellen sich dabei wie folgt dar: Fig. 2 zeigt den Verdichtungsvorgang während eines Kolbenhubes, mit Beginn in Kolbenstellung A, Punkt 1 des Diagrammes. Der Zylinder ist vollständig mit Gas vom Druck p_0, dem Verdampfungsdruck, gefüllt. Der Kolben be-

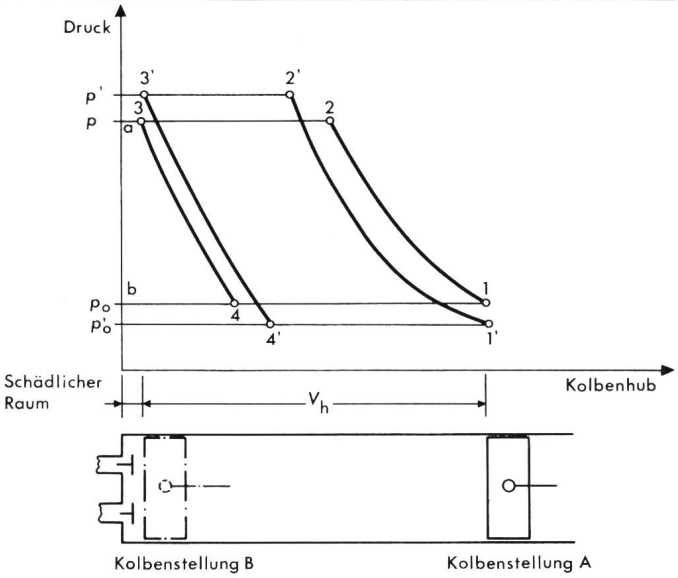

Fig. 2 Druckzyklus im Kompressor

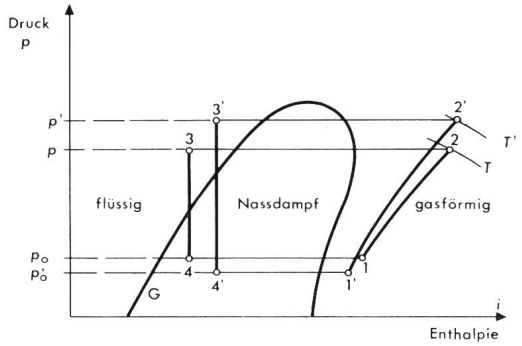

Fig. 3 Wärmepumpenprozess im p–i-Diagramm
G Grenzkurve des Kältemittels

wegt sich in Richtung Stellung B, dem oberen Totpunkt. Sobald der Druck auf p, den Kondensationsdruck, angestiegen ist (2), öffnet das Auslassventil am Zylinderkopf, und das verdichtete Gas wird ausgeschoben, bis der Kolben Stellung B (3) erreicht hat. Dabei verbleibt eine geringe Restgasmenge im sog. schädlichen Raum des Zylinders, bedingt durch die Anordnung der Ventile und die Forderung, dass der Kolben nicht am Zylinderkopf anstossen darf. Es ist also nicht möglich, das gesamte verdichtete Gasvolumen auszustossen. Bewegt sich der Kolben wieder in Richtung Stellung A, so expandiert dieses restliche Gasvolumen wieder bis auf p_0 (4) und füllt damit einen Teil des Zylinders aus. Es kann also nur noch das Gasvolumen 4–1 angesaugt werden.

Weiter zeigt das Diagramm, welche Arbeit für die Verdichtung benötigt wird. Die Fläche 12ab stellt die Arbeit dar, die nötig wäre, wenn das gesamte Gasvolumen ausgestossen werden könnte. Bedingt durch die Rückexpansion des Gasrestes im schädlichen Raum findet ein Arbeitsgewinn von der Grösse der Fläche 43ab statt, so dass die effektiv aufzuwendende Arbeit nur der Fläche 1234 entspricht. Der schädliche Raum vermindert zwar den Arbeitsbedarf, vermindert aber auch gleichzeitig die Förderleistung des Verdichters, so dass bei einer gegebenen Fördermenge grössere Verdichter benötigt werden.

Fig. 2 zeigt weiter noch den Fall der Verdichtung, wenn der Verdampfungsdruck auf p_0' gesunken ist und gleichzeitig der Kondensationsdruck auf p' angestiegen ist, also das, was bei sinkender Lufttemperatur passiert. Die Verdichtung beginnt in Stellung A bei 1′. Ist p' (2′) erreicht, beginnt die Phase des Gasausstosses bis 3′, Stellung B. Hier erfolgt Richtungsumkehr der Kolbenbewegung und die Rückexpansion des Restgases im schädlichen Raum. Wie man sieht, ist 4′–1′ deutlich kürzer als 4–1, was bedeutet, dass weniger Gas angesogen wird. Ebenso ist 2′–3′ kürzer als 2–3, was weniger gefördertes Gas bedeutet. Das Verhältnis $\mu = V_{14}/V_h$, also das Ansaugvolumen zum Hubvolumen V_h, nennt man den Füllungsgrad. μ ist direkt abhängig vom Druckverhältnis p/p_0. Mit steigendem Druckverhältnis sinkt der Füllungsgrad μ und damit auch die Fördermenge des Verdichters.

Betrachtet man noch die aufgewendete Arbeit, so ist die Fläche 1′2′3′4′ kleiner als die Fläche 1234, d.h. die aufzuwendende Arbeit wird kleiner mit steigendem Druckverhältnis. Wird das Druckverhältnis sehr gross, so reduziert sich die Fläche 1234 auf eine schmale Sichel. Die aufgewendete Arbeit wird sehr klein (vom Motor müssen nur noch Reibungsverluste überwunden werden), aber die Förderleistung ist praktisch null. Die Strecken 4–1 bzw. 2–3 schrumpfen zu einem Punkt zusammen. Man sieht daraus, dass grosse Druckverhältnisse

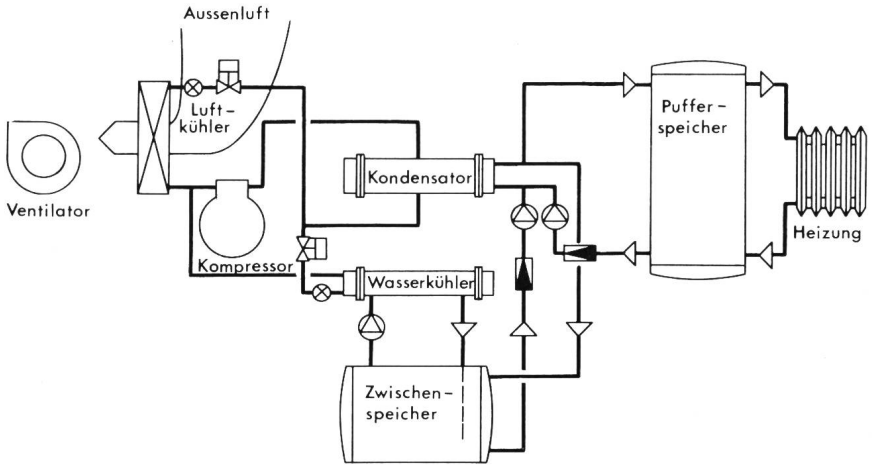

Fig. 4
Schema einer zweistufigen Wärmepumpenanlage

mit nur einer Kompressionsstufe sehr schwer zu überwinden sind. Die Konsequenz, die sich daraus für die Luft-Wasser-Wärmepumpen ergibt, ist, dass bei einstufiger Kompression sehr grosse Verdichter notwendig werden, damit bei tiefen Aussentemperaturen die gewünschte Heizleistung erreicht wird.

4. Der Wärmepumpenkreislauf bei tiefen Aussentemperaturen

Parallel zu dem geschilderten Verhalten des Kompressors bei grossen Druckverhältnissen läuft ein anderes Problem. Fig. 3 zeigt einen Wärmepumpenprozess eingezeichnet in das *p-i*-Diagramm eines Kältemittels, wie es für den Wärmepumpenprozess verwendet wird. Der Kompressor saugt überhitztes Gas (1) beim Verdampfungsdruck p_0 an. Die Verdichtung erfolgt bis auf den Kondensationsdruck p (2) mit der Verdichtungsendtemperatur T. Die Kondensation erfolgt nun längs der Linie 2–3, bis in 3 das Kältemittel gänzlich verflüssigt ist. Von 3 auf 4 erfolgt Drosselung in einem Expansionsventil und von 4 bis 1 Verdampfung des Kältemittels im Luftkühler. Die Strecke 4–1 stellt dabei die im Luftkühler aus der Aussenluft aufgenommene und 2–3 die im Kondensator an das Heizungswasser abgegebene Wärmemenge dar.

Bei sinkender Aussentemperatur, d.h. mit wachsendem Druckverhältnis, verschiebt sich der Wärmepumpenprozess nach 1′2′3′4′. Betrachtet man die bei Verdampfung und Kondensation umgesetzten Wärmemengen, so sieht man, dass diese bei steigendem Druckverhältnis rapide abnehmen: Strecke 4′–1′ < 4–1 und Strecke 2′–3′ < 2–3. Betrachtet man zusätzlich noch die erreichten Verdichtungsendtemperaturen, so liegt T′ erheblich über T und kann bereits gefährliche Werte annehmen.

Werden von einer Luft-Wasser-Wärmepumpe bei tiefen Aussentemperaturen gleichzeitig hohe Vorlauftemperaturen gefordert, so treten demnach folgende Probleme auf:

– Die Förderleistung des Kompressors sinkt wegen dem Einfluss des schädlichen Raumes.

– Die umgesetzten Wärmemengen werden kleiner, infolge der Charakteristik des Kältemittels.

– Es werden hohe Verdichtungsendtemperaturen erreicht, so dass Gefahr für das Öl und damit für den Kompressor besteht.

Die ersten beiden Schwierigkeiten bedeuten, dass für eine Wärmepumpenanlage der Kompressor überdimensioniert werden muss, was zu entsprechend grossen Anlagen führt. Dagegen kann das Problem der hohen Verdichtungsendtemperatur nur über zusätzliche Kühleinrichtungen gelöst werden.

5. Zweistufige Wärmepumpen

Die geschilderten Probleme treten auf, wenn die grosse Druckdifferenz zwischen Verdampfung und Kondensation in einer Kompressionsstufe überwunden wird. Eine Möglichkeit, dies zu umgehen, wird mit der Aerocal-Wärmepumpe realisiert. Diese Wärmepumpe ist eine Kombination zwischen ein- und zweistufiger Anlage. Bei relativ hohen Aussentemperaturen arbeitet sie als normale, einstufige Anlage (Fig. 4): Wärmeaufnahme aus der Aussenluft mittels dem Luftkühler, Verdichtung im Kompressor, Wärmeabgabe an das Heizungswasser im Kondensator, von dort über den Pufferspeicher ins Heizungsnetz.

Sinkt die Aussentemperatur, so wird die Gesamtdruckdifferenz zwischen Verdampfung und Kondensation in zwei

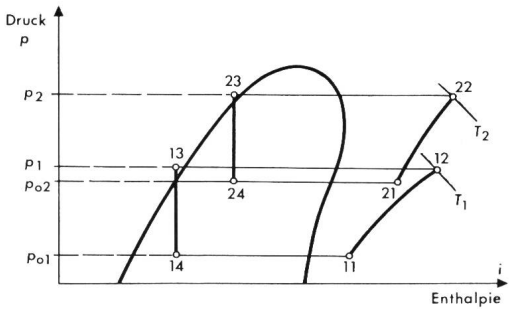

Fig. 5 Zweistufiger Wärmepumpenprozess im *p–i*-Diagramm

Schritten überwunden. Im ersten Schritt wird der Aussenluft, genau wie im Normalbetrieb, mit Hilfe des Luftkühlers ein Teil ihres Wärmeinhaltes entnommen. Nun wird aber nicht auf dem der Vorlauftemperatur entsprechenden Niveau kondensiert, sondern auf einer Zwischenstufe von ca. +30°. Während dieses Vorganges wird der Kondensator vom Wasser des Zwischenspeichers durchflossen, das sich damit erwärmt. Hat der Zwischenspeicher eine bestimmte Temperatur erreicht, so wird automatisch auf die zweite Pumpstufe geschaltet: Mit Hilfe des Wasserkühlers wird dem Zwischenspeicher die vorher hineingesteckte Wärmemenge wieder entzogen und mit Hilfe des Kompressors auf den Kondensationsdruck gebracht, der vom Vorlauf gefordert wird.

Die Darstellung des zweistufigen Prozesses im *p-i*-Diagramm (Fig. 5) zeigt die Verdampfung auf dem Niveau der Aussenluft (14–11) beim Druck p_{01}, dann die Verdichtung auf den Druck p_1 (12) mit der Verdichtungsendtemperatur T_1. Die Kondensation erfolgt von 12 nach 13 bei dem sehr niedrigen Kondensationsdruck p_1. Mit der Wärmemenge 12–13 wird der Zwischenspeicher geladen. Ist die Ladung beendet, so erfolgt der Wärmeentzug mittels Wasserkühler längs der Linie 24–21 beim Druck p_{02}. Es folgen erneute Kompression, jetzt auf den Kondensationsdruck p_2 (22) und die Verdichtungsendtemperatur T_2, Kondensation und damit Wärmeabgabe an das Heizungsnetz von 22 bis 23 auf dem Niveau des Heizungsvorlaufs, anschliessend wieder Drosselung auf p_{02}, den Verdampfungsdruck der zweiten Stufe.

Der Vorteil dieser Bauweise liegt darin, dass die Anlage bei höheren Lufttemperaturen als einstufige Wärmepumpe läuft, während der zweistufige Pumpprozess mit seiner notwendigen höheren Leistungsaufnahme erst bei tieferen Aussentemperaturen aufgeschaltet wird. Dies führt zu kleineren Kompressor-Baugrössen als es bei einstufiger Arbeitsweise der Fall wäre. Die Förderleistung ist gross, und gleichzeitig wird die Verdichtungsendtemperatur in erträglichen Grenzen gehalten.

Es zeigt sich also, dass es zweckmässig ist, bei tiefen Aussentemperaturen die Wärme der Aussenluft in zwei Stufen auf das Niveau des Heizungsvorlaufes zu pumpen. Schädlicher Raum und Kältemittelcharakteristik führen sonst zu recht grossen Kompressoren. Darüber hinaus müssten Zusatzeinrichtungen geschaffen werden, um die hohen Verdichtungsendtemperaturen zu bewältigen.

Adresse des Autors
F. Michels, Ing. Techn. HTL, Störi & Co, 8820 Wädenswil.