

HET PRINCIPE VAN DE WARMTEPOMP

Dr. C. M. Hargreaves
European Services, Eindhoven.

In het kort wordt de aard en het principe van de warmtepomp uitgelegd aan de hand van bekende verschijnselen. Warmtepompen kunnen worden aangedreven door mechanische energie, electriciteit of zelfs door warmte. Verder komt het rendement ter sprake (arbeidsfactor of 'coëfficiënt of performance') en hoe dit afhangt van de temperatuurniveaus. Enkele voorbeelden worden vermeld. Deze voordracht werd gegeven als inleiding op twee meer gespecialiseerde bijdragen aan het symposium over warmtepompen, gehouden in het Mikrocentrum op 30 en 31 oktober 1979.

Er wordt vandaag de dag veel gesproken over warmtepompen. Iedereen heeft ervan gehoord en heeft erover gelezen en dit symposium is georganiseerd om geïnteresseerden verdere informatie te verschaffen. Wegens de wat typische eigenschappen van de warmtepomp heeft deze voor sommigen iets ongeloofwaardigs. Om enige misverstanden uit de weg te ruimen en als inleiding voor de volgende artikelen (1, 2) geven we hier een korte uiteenzetting van de *essentie* van de warmtepomp.

Wat is er nu zo bijzonder aan een warmtepomp? Waarom is er juist nu zoveel belangstelling voor? De reden is, dacht ik, in deze dagen van steeds stijgende brandstofprijzen, dat in principe de warmtepomp *meer* warmte-energie kan leveren dan de energie die nodig is voor de aandrijving ervan. Dit op het eerste gezicht verrassende feit wil ik proberen uit te leggen.

De aard van de warmtepomp

Warmte is een vorm van energie. De chemische energie die opgeborgen zit in kolen of olie of aardgas kan men omzetten in warmte door verbranding.

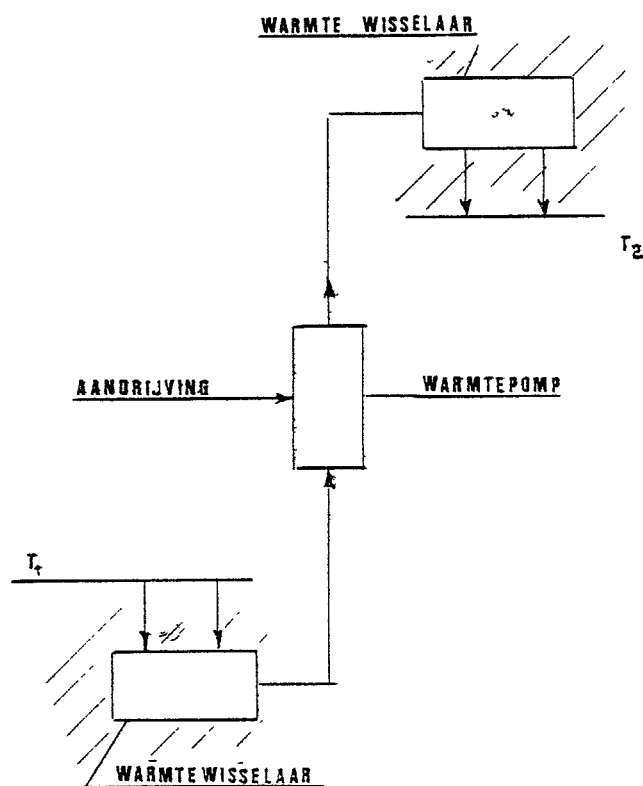
De warmtepomp echter, is géén bron van energie in deze zin. Het is eigenlijk helemaal geen bron. Het is een apparaat dat warmte *verplaatst*. Het haalt warmte uit de omgeving (b.v. lucht, water, aarde, etc.) bij een betrekkelijk lage temperatuur en staat het af aan lucht of water bij een hogere temperatuur. Fig. 1 geeft een schematische voorstelling van dit proces.

Om de aard van de warmtepomp goed te begrijpen moet men beseffen dat *temperatuur* niét hetzelfde als *warmte* is – net zo min als bij electriciteit spanning hetzelfde is als stroom. Zoals men weet, doet een spanningsverschil een elektrische stroom vloeien. Op dezelfde manier heeft een warmtestroom een temperatuurverschil nodig. De warmte vloeit, alleen maar van een *hogere* naar een *lagere* temperatuur, net zoals water van boven naar beneden stroomt.

Met een *pomp* echter, kan men het water omhoog laten vloeien. Natuurlijk moet men dan wel arbeid verrichten. Met een *dynamo* kan men ook electriciteit laten stromen tegen een bestaand spanningsverschil in. Weer kost dat dan arbeid. Op precies dezelfde manier kan men warmte laten stromen van een lage temperatuur naar een hogere temperatuur. Maar weer moet men arbeid verrichten om dit te doen.

Het laatste geval is ons allemaal trouwens wel bekend: het is precies datgene wat gebeurt in een koelkast. Warmte wordt gepompt uit de *binnenkant* van de koelkast (bij een temperatuur dichtbij nul graden Celsius) naar de condensor aan de *buitenkant* (een temperatuur van ongeveer 30-40 graden).

Feitelijk is de koelkast dus een warmtepomp. Soms hoort men zeggen dat een warmtepomp een koelkast is werkend in omgekeerde richting, maar dat is niet juist. Het enige verschil tussen



Figuur 1. Schematische voorstelling van een warmtepompsysteem.

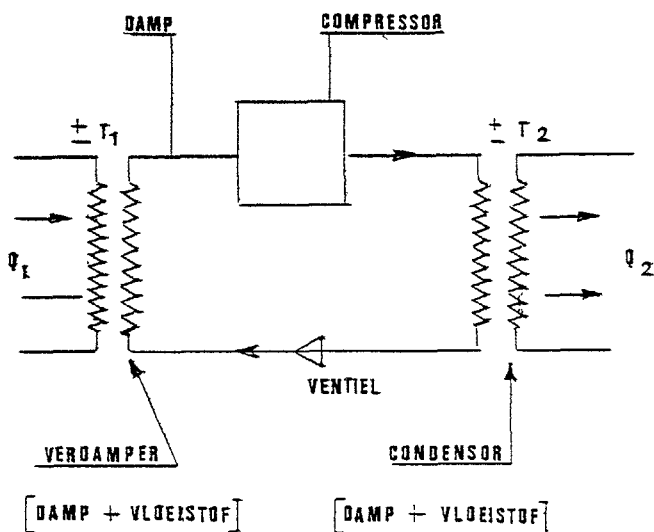
een koelkast en een warmtepomp die voor verwarmingsdoeleinden gebruik wordt, bestaat uit hetgeen men als het nuttige produkt beschouwt. Voor de koelkast is dat de *koude* binnen het apparaat. Voor de verwarmings-warmtepomp is de afgeleverde *warmte* het nuttige produkt, terwijl de koude het afvalprodukt vormt. Daarom ligt de koude kant van zo'n verwarmings-warmtepomp buitenshuis. Men onttrekt warmte aan de buitenlucht, of grondwater of aarde en verplaatst die warmte-energie naar een hogere temperatuur binnenshuis (fig. 1).

Een warmtepomp heeft dan ook *drie* poorten, twee *ingangen* en één *uitgang*. Men voert mechanische- of elektrische-, of zelfs warmte-energie aan één ingang toe; als gevolg daarvan wordt warmte bij een relatief lage temperatuur opgenomen aan de andere ingang en afgeleverd bij een *hogere* temperatuur aan de uitgang.

En nu de vraag: wat kost dat aan arbeid? Bij een eerste kennismaking met de warmtepomp zijn er veel mensen verrast als ze horen dat het rendement groter dan één kan zijn – met andere woorden dat de warmtepomp meer warmte energie kan leveren dan de energie gebruikt voor de aandrijving. Toch is dat zo, en het is niet in strijd met de eerste hoofdwet van de thermodynamica, want de som van de ingaande en uitgaande energie is toch weer nul.

De werking van de warmtepomp

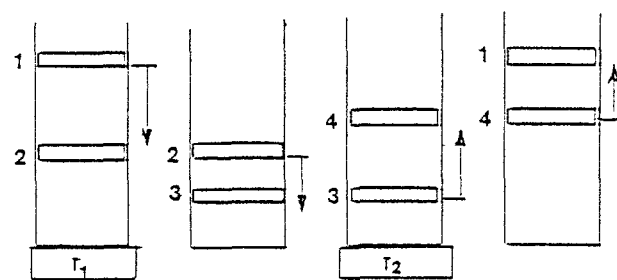
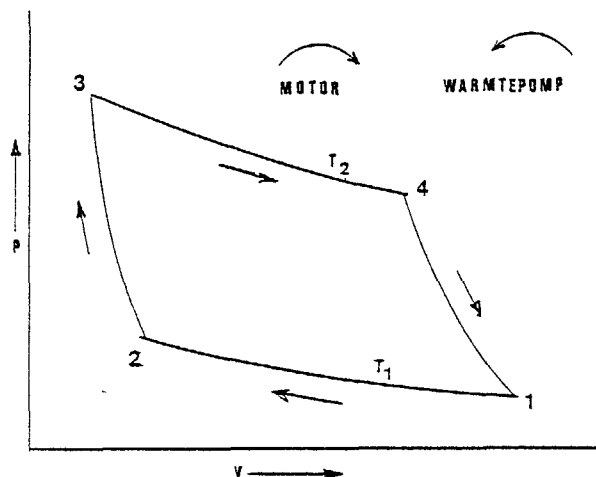
In de praktijk werken de meeste warmtepompen door het comprimeren en expanderen van een gas of een damp-vloeistofmengsel. Fig. 2 toont schematisch zo'n systeem. Na comprimeren wordt de compressiewarmte onttrokken via de warmtewisselaar (rechts); hierna volgt er expansie van het fluidum in het ventiel, waarna door verdamping koeling optreedt. De benodigde warmte wordt aan de omgeving onttrokken via de verdamper (linker warmtewisselaar) met andere woorden: 'koude' wordt daar geproduceerd.



Figuur 2. Schema van een damp-vloeistof warmtepomp.

Voor het gemak echter zullen we een gas, zonder vloeistoffase beschouwen. Maar we kijken eerst naar een thermische motor: deze is precies het tegenovergestelde van een warmtepomp – men stopt er warmte in en er komt mechanische energie uit. De grafiek van fig. 3 laat zien hoe de druk en het volume van het gas in de cilinder, onder de zuiger, veranderen. In de grafiek vertegenwoordigt punt 1 de toestand van het gas als de zuiger zich op plaats 1 bevindt (eerste schets, links). Vanaf punt 1 wordt het gas gecomprimeerd tot punt 2, terwijl we voortdurend de compressiewarmte wegvoeren naar een reservoir bij temperatuur T_1 . Dit betekent dat het gas steeds de temperatuur T_1 behoudt. Dan comprimeren we het gas iets verder van 2 tot 3, nu echter met de cilinder *niét* in contact met het reservoir, maar geheel geïsoleerd. Dan blijft de compressiewarmte in het gas, en de temperatuur stijgt b.v. tot T_2 . Het gas laten we nu (isotherm) expanderen eerst van 3 tot 4 bij constante temperatuur (T_2), waarbij warmte moet worden toegevoegd (daar anders de temperatuur zou dalen). Van 4 keren we terug tot 1, weer met de cilinder geïsoleerd, zodat de temperatuur weer daalt tot T_1 . Het gas is nu terug in zijn begintoestand zodat één cyclus compleet is.

De gebruikte warmte en de geleverde netto mechanische energie tellen wij nu op. (Wij hebben het steeds over een motor). Men kan laten zien dat de warmte Q_2 onttrokken aan het hete reservoir gelijk is aan het totale oppervlak dat ligt tussen de kromme 3-4 en de x-as, en dat dit gelijk is aan



Figuur 3. Samenpersing en uitzetting van een gas in een thermische motor (rechtsom) en een warmtepomp (linksom).

$$Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

De warmte weggevoerd bij de lagere temperatuur T_1 is

$$Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

De netto mechanische arbeid W is gegeven door $Q_2 - Q_1$ (die gelijk is aan het oppervlak binnen de gesloten cyclus 1, 2, 3, 4):

$$W = R(T_2 - T_1) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Men definieert nu als *rendement* η de verhouding W/Q_2 , zodat

$$\eta = \frac{W}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Hier zijn de temperaturen altijd de absolute temperaturen, uitgedrukt in Kelvin (K), d.w.z. graden Celsius plus 273. Als de compressie van het gas van 1 tot 2 en de expansie van 3 tot 4, inderdaad *isotherm* gebeuren (wat normaliter alleen kan bij zeer langzaam verloopende processen) en als er geen verdere wrijvingsverliezen zijn, hebben wij een zgn. Carnot proces beschreven dat het *hoogst mogelijke* rendement heeft voor de gegeven temperaturen T_1 en T_2 . Het is onmogelijk een hoger rendement te behalen voor een motor werkend tussen deze temperaturen.

Als voorbeeld nemen we een motor waarin het gas verhit wordt tot $T_2 = 427^\circ\text{C} = 700\text{ K}$, en gekoeld tot ongeveer kamertemperatuur, $T_1 = 300\text{ K}$. Het theoretisch (Carnot) rendement zou dan een waarde hebben van

$$\frac{700 - 300}{700} \approx \frac{400}{700} \approx 55\%$$

Wegens allerlei verliezen is dit in de praktijk aanzienlijk minder. En nu, de warmtepomp. Men beschrijft de cyclus dan in de omgekeerde richting (fig. 3). De zuiger wordt nu van buitenaf aangedreven, b.v. door een electromotor of iets anders. Men comprimeert nu het gas tussen 1-4 en 4-3 en voert de compressiewarmte af bij de hogere temperatuur T_2 . Het gas zet uit langs 3-2 en ook tussen 2 en 1. In dit laatste traject wordt warmte geabsorbeerd uit het reservoir bij temperatuur T_1 . Als wij de warmtepomp gebruiken voor verwarming, dan is het de warmte Q_2 , afgegeven langs 4-3, dus bij de hogere temperatuur T_2 , die van belang is.

Omdat wij tot nog toe de cyclus als verliesvrij beschouwen, een zogenaamde omkeerbaar proces, zijn alle hoeveelheden warmte en arbeid precies hetzelfde als in de motor. Nu echter stoppen we er de arbeid W in en krijgen we er een warmtehoeveelheid Q_2 uit. Het rendement of beter de arbeidsfaktor is dan nu

$$A = \frac{Q_2}{W} = \frac{1}{\eta} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Voor de motor was η altijd < 1 . Voor de warmtepomp is $\frac{Q_2}{W}$

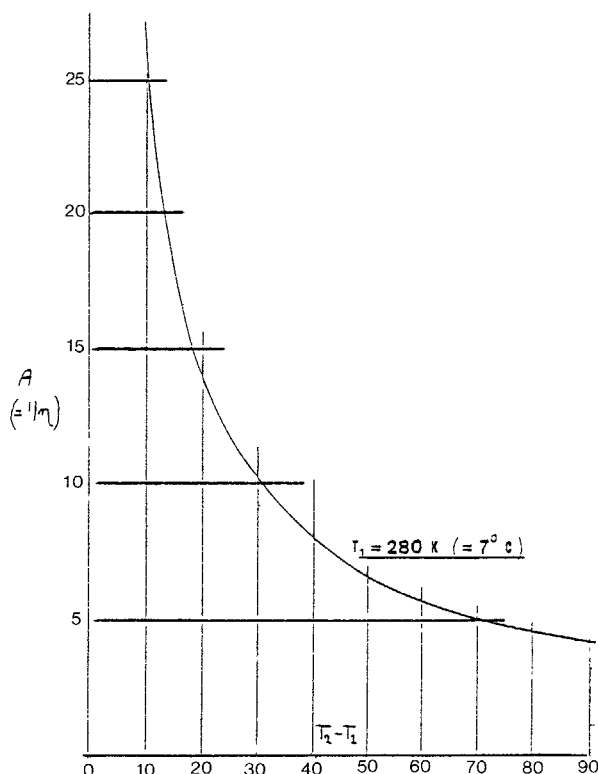
daarom theoretisch groter dan één. Om deze reden gebruikt men meestal voor de warmtepomp de term arbeidsfaktor (Engels: coefficient of performance) i.p.v. rendement.

Een voorbeeld:

Als het reservoir waaraan we warmte onttrekken een temperatuur T_1 heeft van b.v. 7°C , dus 280 K , en we willen die warmte-energie afstaan bij $47^\circ\text{C} = 320\text{ K}$, dan is de arbeidsfaktor van de warmtepomp theoretisch gelijk aan

$$A = \frac{320}{320 - 280} = \frac{320}{40} = 8.$$

Fig. 4 laat het verloop zien van de theoretische arbeidsfaktor als functie van het temperatuurverschil dat men wil overbruggen.



Figuur 4. Afhangelijkheid van de arbeidsfaktor $A (= 1/\eta)$ van het verschil tussen de temperatuur van de warmtebron T_1 en de temperatuur T_2 waarop men de warmte wil afleveren.

Men ziet dat voor het pompen van warmte over een klein temperatuurtraject, enorme arbeidsfactoren theoretisch mogelijk zijn. Hoewel deze theoretische waarden bij lange na niet bereikt worden, is het blijkbaar voordelig als het verschil tussen de bron- en de verbruikstemperatuur zo klein mogelijk is. Dit wordt nog duidelijker als we bovenstaande uitdrukking voor A herschrijven, in de vorm

$$A = \frac{1}{1 - T_1/T_2}$$

Naarmate $T_1/T_2 \rightarrow 1$ wordt het interessanter.

In de praktijk zijn er allerlei verliezen: de cyclus is bij lange na niet omkeerbaar zodat de arbeidsfaktor gewoonlijk slechts 1.5-2 is voor de gangbare temperatuurverschillen. Dit is vrij teleurstellend. Het verschil tussen wat theoretisch mogelijk zou zijn en wat tot nu toe haalbaar was laat zien hoeveel werk er nog te doen is op dit gebied.

In de volgende artikelen vindt men meer over ontwikkelingen die gaande zijn met warmtepompen, speciaal bij vrij grote systemen.

Literatuurlijst

1. Ir. P. H. H. Leijendeckers, 'De toepassing van de Warmtepomp in een Stroomversnelling, zie deze uitgave.
2. Ir. K. Wassenaar, 'De Toepassing van de Warmtepomp in Verband met Stadsverwarming'; zie deze uitgave.
3. Ir. H. van der Ree, 'De Warmtepomp, Grondslagen en Geschiedenis', *Klimaatbeheersing* nr 6 (juni 1973) p. 294-315.
4. Ir. W. E. J. de Beijer, 'Overzicht van Buitenlandse Onderzoeken over warmtepompen'; *Klimaatbeheersing* nr. 2, jrg. 7 (febr. 1978) p. 64-71.
5. Frederick A Costello, 'A hybrid solar air conditioning system'; *Solar Energy*, Vol 18, nr. 2, 1976 p. 149-153.
6. F. Bosboom, 'Energie besparen met de warmtepomp'; *Intermediair*, 12e jrg. nr. 4, 23 jan 1976, p.11.
7. D. A. Sarkes, J. A. Nicholls, N. S. Menzer, 'Gas Fired Heat Pumps, an Emerging Technology'; *Ashrae Journal*, March 1977, p. 36-42.
8. Frigen-Forum, 28 febr. 1975, 'Wärmepumpen'; Hoechst.
9. Ir. H. van der Ree, 'Thermisch gedreven Warmtepompen (1)'; *Klimaatbeheersing* nr. 9, sept 1978
10. Ir. H. van der Ree, 'Thermisch gedreven Warmtepompen (2)'; *Klimaatbeheersing* nr. 10, okt. 1978.
11. C. L. Spigt en S. H. A. Begemann, 'Toepassingsmogelijkheden van Warmtepompen in Nederland'; *Energie Spectrum* 79/1, blz 6 t/m 13.