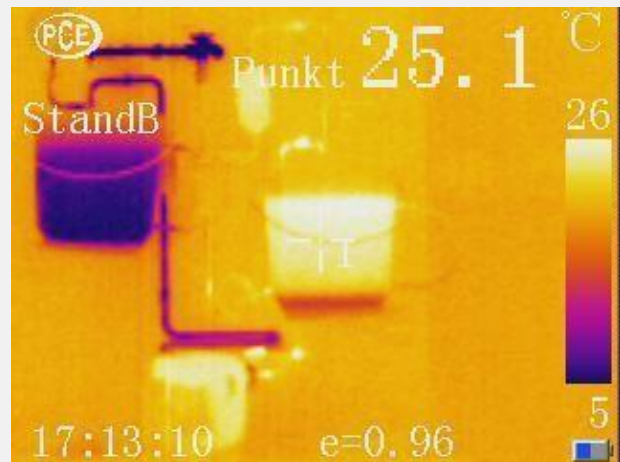
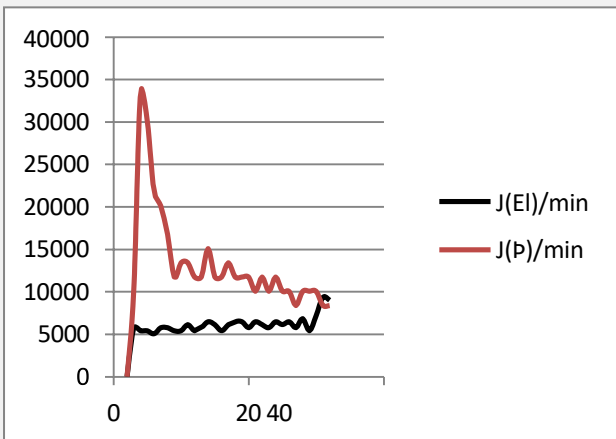
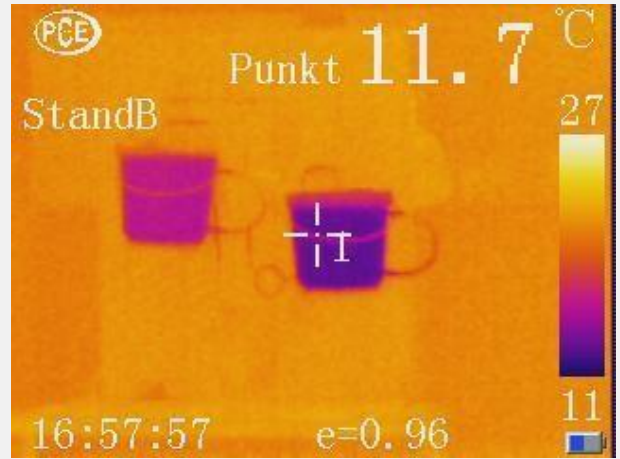


Experimenten met de warmtepomp



CONCEPT

INHOUD

Een paar zinnen vooraf	4
Van "koud" naar "warm"	5
Model van een warmtepomp (LD-Didactisch)	6
Eerste tests met het warmtepompmodel	7
Excursus: Water als (ongeschikt) koudemiddel	8
Speciale eigenschappen van het koudemiddel dat wordt gebruikt in koelmachines	10
De "truc" van de koelmachine: gebruik verandering van toestand (en dus enthalpie van verdamping)	11
Energiebesparende kampioenen? Het rendement van de warmtepomp	11
Rendement van de warmtepomp: prestatiecoëfficiënt	12
Jaarlijkse prestatiefactor	13
Warmtebeeldcamera	13
Warmtepomp en vloerverwarming	14
Het testen van de efficiëntie (prestatiecoëfficiënt)	14
Wat geven de twee manometers aan?	17
Warmtepomp ontmoet warmtebeeldcamera	19
Experimenten rond warmtepompen	20

Van "koud" naar "warm"...

Het verwarmen van water kost energie. Bijvoorbeeld elektrische energie.

- Koud water bevat minder energie (warmte) dan warm water.
- Bij verhitting wordt energie aan het water toegevoegd.
- Een waterkoker verbruikt minstens evenveel of meestal **meer** energie dan er dan er in het warme water zit.

Maar:

- De warmtepomp verwarmt water en verbruikt **minder** energie dan er vervolgens in het warme water zit.

Normaal gesproken stroomt de warmte van warm naar koud, bijv. van glühwein in de koude winterlucht. De glühwein wordt koud en de omgeving wordt wat warmer. Dit proces gaat door totdat de glühwein en de winterlucht even warm zijn en in beide dezelfde hoeveelheid energie bevatten. Kan energie in het geval van de "warmtepomp" ook "bergopwaarts" stromen? Koude wordt hier gebruikt om er warmte van te maken! Natuurlijk kan energie niet "bergopwaarts" stromen en zal de koude winterlucht de glühwein nooit kunnen opwarmen.

Magie? Nee: natuurkunde die je tot op de bodem kunt uitzoeken!

Allereerst, wat heeft kou met warmte te maken?

Het kan gemakkelijker te begrijpen zijn als je breekt met het gebruikelijke idee dat warmte iets anders is dan kou en beide vervangt door de opvatting dat 'kou gewoon minder warmte is'.

Om een warmtepomp te begrijpen, helpt een eenvoudig experiment om aan de slag te gaan:

- Duik een (!) Lever water op normale temperatuur in. Terwijl de hand die er dan uit wordt getrokken in de lucht droogt, lijkt het ons kouder dan de andere hand die droog is gebleven.
De reden: Tijdens verdamping (verdamping) onttrekt de waterfilm energie (warmte) aan de omgeving (en met name warme hand). Deze energie gaat niet verloren: het wordt meegevoerd met de gasvormige en onzichtbare waterdamp. De onttrokken warmte "ontbreekt" nu uit de huid. Ze heeft het koud.
Op een gegeven moment en ergens komt de waterdamp in omstandigheden waar het door afkoeling weer vloeibaar kan worden.
Tijdens condensatie komt de tijdens de verdamping geabsorbeerde warmte weer vrij.

In de volksmond wordt deze koeling "verdampingskoeling" genoemd. De "warmtepomp" is gebaseerd op dit principe.

Model van de warmtepomp (LD-Didactisch)

Het model bestaat uit de volgende elementen (zie figuren):

1. Blauwe emmer
2. Rode emmer
3. Compressor
4. Expansieventiel
5. Digitale thermometer
6. Manometer (lagedrukzijde)
7. Manometer (hogedrukzijde)



Foto's: Ingo Mennerich

De twee emmers van 5 liter, een blauwe (1) en een rode (2) bevatten in eerste instantie 4 liter koud water per stuk. Twee digitale thermometers (5) meten de temperaturen in de twee emmers.

Beide bakken zijn met elkaar verbonden door een gesloten leiding.

Verborgen in elk van de twee emmers is een spiraalvormige warmtewisselaar als onderdeel van het leidingsysteem (zie onderstaande figuur).

Een "koudemiddel" circuleert in het leidingsysteem, dat afwisselt tussen gasvormige en vloeibare toestanden binnen het systeem.

2 manometers meten de druk van het koudemiddel, links (6) na het passeren van het expansieventiel (lagedrukzijde) en rechts (7) na het passeren van de compressor (hogedrukzijde).



Zelfde foto met emmers eraf.

Hier zie je de twee warmtewisselaars, links de verdamper, rechts de condensor.



3



4

De elektrisch bediende compressor (3) zuigt de Gasvormige koudemiddelen zetten het onder hoge druk zodat het wordt samengeperst en verwarmd. Het stroomverbruik kan worden gemeten met een stopcontactenergiemonitor.

Het expansieventiel (4) brengt het vloeibare koudemiddel onder lage druk zodat het op zijn verdere reis kan verdampen. De openingsbreedte van de klep wordt temperatuurgeregeld door een bimetaal.

Eerste tests met het warmtepompmodel

Voor aanvang van het experiment worden beide emmers gemengd met elk 4 liter even warm water (bijv. 15°C) gevuld en op de uitklapbare platen geplaatst.

- De koperen spoelen (warmtewisselaars) moeten volledig bedekt zijn met water .
- Zodra de elektriciteit wordt ingeschakeld, "pompt" de warmtepomp warmte van de blauwe emmer naar de rode.
- Daarbij wordt energie (warmte) uit het water gehaald in de blauwe emmer: het water wordt kouder.
- In de rode emmer wordt energie aan het water toegevoegd: het water wordt warmer.
- Dit kan zowel gevoeld worden als gemeten worden met thermometers.

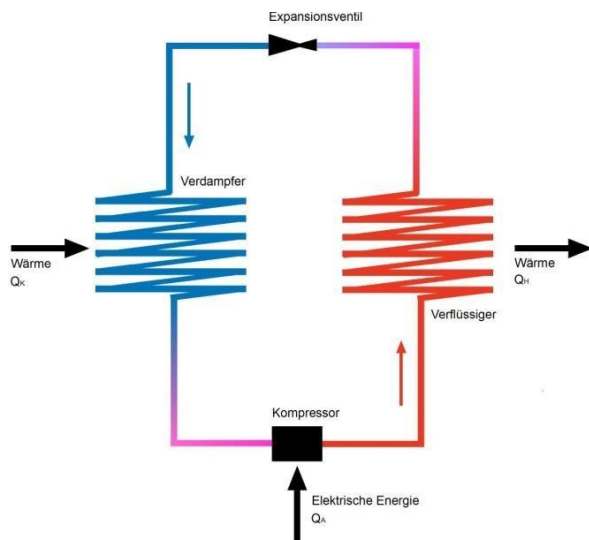
De warmte wordt getransporteerd door het "koudemiddel" dat, aangedreven door de compressor, circuleert in het gesloten leidingsysteem.

- De elektrische compressor is hetzelfde als de koelkast.
- Het is een pomp en compressor tegelijkertijd:
- Het koudemiddel is gasvormig bij normale kamertemperatuur en lage druk.
- Het wordt vloeibaar gemaakt onder hoge druk.

De "truc" van de "chillers" warmtepomp of warmtepomp Koelkast bestaat uit het feit dat het koudemiddel aan de ene kant wordt samengeperst ("gecomprimeerd") terwijl het door het gesloten leidingsysteem gaat en aan de andere kant kan uitzetten (uitzetten).

Het koudemiddel verandert eenmaal van de gasvormige naar de vloeibare toestand en eenmaal van de vloeibare naar de gasvormige toestand. We hebben dus te maken met twee toestanden van materie.

De wisselende overgang van de ene toestand naar de andere, afgedwongen door de warmtepomp, stelt u in staat om veel meer energie uit het systeem te halen dan u erin stopt...



Principe van een compressiekoeler (warmtepomp) Grafisch:

Ingo Mennerich

In de linker warmtewisselaar (**verdampfer**) neemt het verdampende koudemiddel absorbeert warmte (Q_k) uit de omgeving. Het koudemiddel moet *kouder* zijn dan de omgeving.

De elektrische **compressor** zuigt het gasvormige en verwarmde koudemiddel aan en comprimeert het onder hoge druk. Daarbij wordt extra warmte (Q_A) toegevoegd.

In de juiste warmtewisselaar (**condensor**) draagt het condenserende koudemiddel de warmte (Q_H) over aan de omgeving. Het koudemiddel moet *warmer* zijn dan de omgeving.

In het **expansieventiel** begint het gekoelde en vloeibare koudemiddel onder lage druk weer gasvormig te worden.

Water als (ongeschikt) "koudemiddel"

Voordat we ingaan op de eigenschappen van het "koudemiddel" dat warmte transporteert in koelmachines zoals koelkasten en airconditioners, is hier een korte uitweiding in de fysica van water. In tegenstelling tot het koudemiddel tetrafluorethaan heeft water het voordeel dat het algemeen bekend is, overal te vinden is en veilig kan worden behandeld, en toch het principe van een "koudemiddel" kan illustreren.

De voor de hand liggende vraag waarom het milieubelastende koudemiddel tetrafluorethaan en niet alleen water in de koelkast en in de warmtepomp wordt gebruikt, moet voorlopig achterwege worden gelaten.

Hoe moet de term "koudemiddel" worden opgevat in relatie tot water?

Water absorbeert energie bij verhitting en geeft het af wanneer het wordt afgekoeld. Per liter en graad Celsius (= Kelvin, K) wordt 4.182 kilojoule (kJ) uit de omgeving gehaald. aan het milieu.

Om de vier liter water (4 kg) in de rode emmer van het warmtepompmodel te verwarmen van 10°C tot 40°, moet er $4 \text{ kg} \times 30^\circ\text{C} \times 4,182 = 501,8 \text{ kJ}$ energie aan worden geleverd. De geleverde energie wordt opgeslagen in de vorm van kinetische energie in de watermoleculen.

Energie gaat niet verloren: bij latere afkoeling tot de oorspronkelijke temperatuur wordt 501,8 kJ teruggegeven aan de omgeving. Daarbij verliezen de moleculen kinetische energie.

Water kan vast (ijs), vloeibaar (water) of gasvormig (waterdamp) zijn.

In vaste toestand is de kinetische energie van de watermoleculen zo laag dat ze aan elkaar gebonden zijn door de elektrische krachten eromheen. Boven het absolute nulpunt zijn de moleculen niet in rust, maar oscilleren zwakker of sterker heen en weer, afhankelijk van de temperatuur. Door warmte toe te passen wordt kinetische energie aan de moleculen toegevoegd, waardoor ze sterker gaan trillen.

Alshun juiste beweging tot op zekere hoogte neigt, kunnen groepen watermoleculen zich van elkaar losmaken en onafhankelijk van elkaar bewegen. Het water is nu vloeibaar. Als er meer warmte wordt toegevoegd, wordt op een gegeven moment een toestand bereikt waarin de voorheen nog bestaande

elektrische krachten en de watermoleculen bewegen individueel door de ruimte.

Als een zeer simplistische analogie kan men zich een groep mensen voorstellen die roerloos blijven en dicht bij elkaar in de kou kruipen, steeds onrustiger worden naarmate de temperatuur stijgt en uiteindelijk wild verward raken in de hitte.

Tijdens de overgang van de vaste naar de vloeibare naar de gasvormige fase is extra energie nodig om de intermoleculaire bindingen op te lossen. Deze extra energie wordt "enthalpie van smelten" of "warmte van fusie" genoemd. Eén kilogram ijs moet 333,5 kJ/kg bevatten: K smeltwarmte om er volledig vloeibaar water van te maken. Dit is ook de reden waarom de temperatuur van (goed geroerd!) IJswater blijft op 0°C totdat het volledig smelt.

Hetzelfde geldt voor koken: tijdens de overgang van 1 kg vloeibaar water naar de gasvormige fase kost het vrijkomen van de waterstofbruggen tussen de watermoleculen extra "verdampingswarmte" (enthalpie van verdamping), namelijk 2257 kJ / kg · K

Naarmate het water afkoelt, neemt de kinetische energie van de moleculen af. Dit geldt met name voor de overgang van gasvormig naar vloeibaar of vloeibaar. van de vloeibare naar de vaste fase.

Energie gaat echter niet verloren: de kinetische energie van de watermoleculen wordt overgedragen aan de moleculen van de omgeving, die daardoor wordt verwarmd.

Wanneer water bevriest, verliest het energie: 1 kilogram water geeft 333,5 kJ/kg wanneer het stolt. K-energie (enthalpie van stolling, "warmte van stolling") naar de omgeving. Dit is precies de hoeveelheid energie die wordt geïnvesteerd in de overgang van ijs naar water als warmte van fusie.

Tijdens condensatie geeft de waterdamp de energie af die in de verdamping wordt gestoken in de vorm van condensatie-enthalpie (condensatiewarmte).

Per kilogram waterdamp, d.w.z. 2257kJ/(kg · K).

Warmtecapaciteit, fusiewarmte, verdamping, condensatie en stolling:

Ijs	1.377 - 2.1 kJ/(kg · k)	Ijs
Smelten	333,5 kJ/ kg	Bevriezen
Water	4.182 kJ/(kg · k) (20°C)	Water
Verdampen	2257 kJ/ kg	Condenseren
Stoom	2,08 kJ/(kg · k) (100°C)	Stoom

In eenvoudiger en informeel bewoordingen:

- Tijdens het smelten en koken wordt extra warmte "verbruikt"
- Tijdens condensatie en bevrozing komt warmte "vrij".
- Of: Tijdens het smelten en koken wordt de warmte aan de omgeving onttrokken, die weer vrijkomt bij condensatie en bevrozing.

Omdat water onder geschikte omstandigheden zelfs bij temperaturen onder het kookpunt verdampt, is het hele proces veel complexer. Voor een goed begrip van het "koudemiddel" kan deze eenvoudige presentatievolstaan.

Speciale eigenschappen van het koudemiddel dat wordt gebruikt in koelmachines

Een voor de hand liggende vraag zou zijn waarom we niet gewoon water zouden gebruiken in plaats van tetrafluorethaan, dat niet giftig en niet-ontvlambaar is, maar niet zonder problemen is in termen van het broeikaseffect.

Volgens DIN wordt een koudemiddel gedefinieerd als "een vloeistof die wordt gebruikt voor warmteoverdracht in een koelsysteem en die warmte absorbeert bij lage temperatuur en druk en warmte afgeeft bij hogere temperatuur en druk, meestal de toestand van de vloeistof verandert." (Wikipedia, "Koudemiddelen"). Onder een verandering van toestand wordt verstaan een verandering in de geaggregeerde toestand. In principe geldt dit ook voor water - het draagt de koudemiddelaanduiding R-718 - behalve dat de temperaturen van deze toestandsveranderingen niet geschikt zijn voor gebruik in koelsystemen.

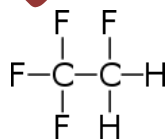
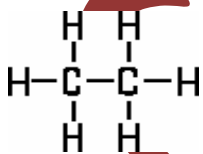
Water bevriest onder normale druk bij 0°C en kookt bij 100°C. In de verdampers zou het bevriezen, de circulatie blokkeren en uiteindelijk het ruwe barstendoor het volume te vergroten. Aan de andere kant zou een overgang van de vloeibare naar de gasvormige toestand (en vice versa) alleen worden verwacht bij 100 °C.

Water heeft bij 2088 kJ/kg een aanzienlijk hogere verdampingsenthalpie dan tetrafluorethaan (277 kJ/kg), maar kan dit voordeel behalen bij relatief lage temperaturen, bijv. in de koelkast of woonkamers. Het kookt alleen bij 100°C. Wat nodig is, is een stof die gasvormig kan zijn bij "normale" temperaturen en lage druk, maar gemakkelijk vloeibaar kan worden gemaakt onder druk en vergelijkbare temperaturen. Bovendien mag het niet bevriezen binnen het gebruikelijke temperatuurbereik tijdens het gebruik. Waterstoffluorchloriden (CFK's) hebben dergelijke eigenschappen en worden al vele jaren gebruikt in "koelmachines" zoals koelkasten en airconditioners. Ze hebben echter een groot potentieel om de ozonlaag te vernietigen die ons beschermt tegen de UV-straling van de zon.

Daarom worden CFK's steeds vaker vervangen door meer "milieuvriendelijke" middelen zoals Fluorkoolwaterstoffen (HFK's). Deze omvatten tetrafluorethaan.

Het koudemiddel tetrafluorethaan (R134a) dat wordt gebruikt in koelkasten, airconditioners en warmtepompen is een fluorkoolwaterstof met de molecuulformule $C_2H_2F_4$.

Het is vergelijkbaar met het alkaanethaan (C_2H_6), behalve dat 4 waterstofatomen worden vervangen door fluoratomen.



- Het smeltpunt van tetrafluorethaan is - 101°C, het kookpunt is - 26°C (bij normale druk!).
- Dus bij kamertemperatuur en onder normale druk is het gasvormig.
- De verdampingswarmte is 217 kJ/kg.
- Tetrafluorethaan is niet ozonafbrekend (geen gechloreerde koolwaterstof), maar het heeft een aardopwarmingsvermogen van 1430 ($CO_2 = 1$).
- Tetrafluorethaan is niet giftig (in tegenstelling tot bijv. aan de overigens milieuvriendelijke ammoniak R-717 met een hoge verdampingssterkte).
- Het is niet-ontvlambaar (in tegenstelling tot bijvoorbeeld Gas ethaan R-170).
- Het is van lage viscositeit (het moet gemakkelijk stromen in vloeibare vorm!).
- Het is niet-corrosief (leidingen mogen niet worden aangevallen).

De " truc" van de koelmachine:

Gebruik verandering van toestand (en dus enthalpie van verdamping)

In het geval van de warmtepomp is er een geforceerde verandering in de aggregaattoestand van het koudemiddel in het cyclusproces:

- De **compressor** zuigt het gasvormige koudemiddel op, comprimeert en maakt het vloeibaar.
- Bij dit proces komt condensatiewarmte vrij in de omgeving
- Extra warmte wordt gegenereerd door het verhogen van de druk
- De warmte wordt via de warmtewisselaar afgegeven aan de omgeving.
- Het water in de rode emmer wordt warmer.
- Het **expansieventiel** laat het vloeibare koudemiddel **verdampen**.
- Het verdampingsproces onttrekt warmte aan de omgeving (warmtewisselaar).
- Het water in de blauwe emmer wordt kouder.

Energiebesparende kampioenen?

Het rendement van de warmtepomp

Om het gasvormige koudemiddel te comprimeren en door het systeem te drijven, is energie nodig. De compressor "verbruikt" dus elektriciteit. Wat is de efficiëntie van deze machine?

Meting van het stroomverbruik



Om het stroomverbruik voor de duur van het experiment te verminderen, tussen het stopcontact en de stekker van de warmtepomp wordt een energiemonitor geplaatst.

Het maakt de voortdurende controle van de

- Spanning (V)
- Tijd (min, s)
- Vermogen (W)
- Energie (Wh)

en de kosten, indien een waarde van €/kWh wordt vastgesteld.

De reset van het apparaat wordt gedaan door de knop "Tijd" gedurende 3 seconden ingedrukt te houden.

Door het gemiddelde vermogen (W) en de tijd (en) te vermenigvuldigen, kan het elektrische werk W ($Ws = \text{wattseconden}$) worden berekend.

1 Ws = 1 J, dus het werk W is gelijk aan de energie E .

De energie wordt weergegeven in wattuur (Wh) en moet nog worden omgezet in wattseconden (Ws):
 $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Ws} = 3600 \text{ J} = 3,6 \text{ kJ}$

- Het stroomverbruik kan met een eenvoudig meetapparaat worden geregistreerd en bijvoorbeeld elke minuut worden geregistreerd.
- Eén watt komt overeen met een energiestroom van één joule per seconde ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$).
- Als de meter gedurende 30 minuten een elektrisch vermogen van 100 watt aangeeft, is de energiestroom $100 \times 1800 \text{ seconden} = 18000 \text{ joule}$ of 18 kJ. Of $E = \text{Wh} \times 3600 \text{ s}$

$$E = P \times t \times 4,19 \text{ KJ}$$

In het geval van 100 W vermogen en 30 minuten proeftijd

$$E = 100 \text{ W} \times 1800 \text{ s} = 18000 \text{ J} = 18 \text{ kJ}$$

Wat is de verhouding tussen de geïnvesteerde elektrische energie en de energieabsorptie van het water?

- Om een liter water (1 kg) met 1°C (of 1 K) te verwarmen, moet het worden voorzien van 4.182 kilojoule (4182 joule) energie.
- Het volume van het verwarmingswater is bekend (bijv. 4 kg).
- Het begin en het einde van het experiment moeten worden vastgelegd.
- De begin- en eindtemperatuur moeten ook worden genoteerd. Je moet het water goed roeren!

De rest bestaat uit een eenvoudige formule:

$$E = m \times \Delta T \times 4,18 \text{ KJ}$$

Bij 4 kg water en een temperatuurstijging van 30°C :

$$E = 4 \text{ kg} \times 30^\circ\text{C} \times 4,18 \text{ kJ} = 501,8 \text{ kJ}$$

Dit zou een geweldig resultaat zijn:

Voor 18 kJ geïnvesteerde elektrische energie zou je meer dan 500 kJ thermische energie krijgen!

Maar onze warmtepomp is niet zo efficiënt. Al was het maar omdat leidingen en warmteaccumulatoren (rode emmer) niet geïsoleerd zijn.

Rendement van de warmtepomp: prestatiecoëfficiënt

Het quotiënt tussen de door het water geabsorbeerde thermische energie (E_{th}) en de in de compressor geïnvesteerde elektrische energie (E_{el}) wordt uitgedrukt als de prestatiecoëfficiënt ϵ (Eta) of COP (Prestatiecoëfficiënt).

De prestatiecoëfficiënt kan worden bepaald over de gehele werkingsduur of bijvoorbeeld: elke minuut, wanneer de thermische energie toeneemt en het elektriciteitsverbruik wordt geregistreerd en opgeladen. Hieruit blijkt dat de prestatiecoëfficiënt in de loop van het proces afneemt. Dit betekent dat er steeds meer elektrische energie gebruikt moet worden om het water te verwarmen. Tegelijkertijd is de temperatuurdaling per tijdseenheid in het koude vat bijna nul.

De belangrijkste redenen:

- Er kan steeds minder warmte worden onttrokken aan de koeling (en uiteindelijk het vrieswaterreservoir).
- Het toenemende temperatuurverschil tussen het koude en het warme water maakt dat de energie "berg" steeds hoger overwonnen moet worden.
- Hierbij geldt: Hoe lager het temperatuurverschil tussen het primaire energiebronwater en de verwarmingsstroomtemperatuur, hoe hoger de prestatiecoëfficiënt.

Als het koudemiddel temperaturen onder 0°C bereikt, begint het water in de directe omgeving van de warmtewisselaar te bevriezen. Tegelijkertijd wordt het expansieventiel eerst bedekt met water en vervolgens met ijs (condensatie en sublimatie van waterdamp in de lucht).

De daling van de prestatiecoëfficiënt moet worden verholpen door constante toevoer en afvoer van water, zowel in de kou als in het warmtereservoir. De slangaansluitingen ("olijven") op beide emmers maken het mogelijk om een koudwaterinlaat aan te sluiten en het warme water af te voeren, bijvoorbeeld in een modelverwarming.

In het geval van warmtepompverwarmingssystemen wordt voortdurend nieuw water aan de verdamper geleverd, bijvoorbeeld uit een gesloten circuit dat zich diep in de grond uitstrekt en op een uniforme temperatuur (ongeveer 10 °C) en het hele jaar door vorstvrij is. Op deze manier kan het temperatuurverschil tussen het opgepompte water en de verwarmingsstroomtemperatuur endaar mee de prestatiecoëfficiënt (COP-waarde) relatief klein worden gehouden, zelfs bij lage (lucht)buitentemperaturen. In de "bijenstal" van het School Biology Center strekt de extractie- of slijkput zich ongeveer 60 m diep in de grond uit.

Jaarlijkse prestatiefactor

Het rendement van een warmtepomp kan gemeten worden aan de hand van de zogenaamde seizoensgebonden prestatiefactor.

Het is de prestatiecoëfficiënt die over het jaar wordt geprojecteerd, d.w.z. de verhouding tussen de geïnvesteerde elektrische energie en de nuttige energie (warmte). Goede warmtepompen, zoals directe expansiesystemen, hebben een jaarlijkse prestatiefactor van >5. Dit betekent niets anders dan dat je meer dan 5 kWh warmte krijgt voor één kWh elektriciteit.

Warmtebeeldcamera

Met een warmtebeeldcamera kunnen de warmtestromen in het warmtepompmodel en de warmteafvoer in de ruimte zichtbaar worden gemaakt.

Een warmtebeeldcamera pikt de infraroodwarmtestraling (infrarood licht), die onzichtbaar is voor onze ogen, op en reproduceert deze in valse kleuren.



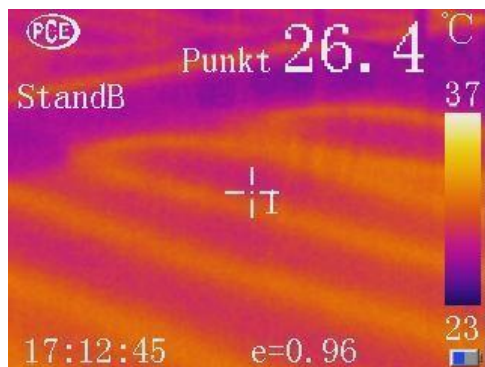
Scholen kunnen de PCE TC 31 warmtebeeldcamera lenen bij het School Biology Centre.

Het scherm dient als IR-kijkvenster en is ook een meetinstrument waarvan de parameters kunnen worden ingesteld (bijv. temperatuurbereik, maximale temperatuur).

De camera slaat beelden op in jpg formaat. Je kunt ze op een computer afspelen via een meegeleverde aansluitkabel.

Warmtepomp en vloerverwarming

De warmtepomp in de bijenstal is ontworpen als een lage temperatuur vloerverwarming.



De warmtebeeldcamera detecteert (zelfs in het pikkedonker) de verwarmingswaterlussen in de vloer van onze bijenstal.

Het kruis in het midden van de afbeelding wijst naar een punt met een temperatuur van 26,4°C.

Het geregistreerde temperatuurbereik is van 23°C (blauw) tot 37°C (lichtgeel)

Foto: Ingo Mennerich

Het testen van de efficiëntie (prestatiecoëfficiënt)

Het volgende meetrapport, dat een periode van 30 minuten beslaat, toont elke minuut

- De watertemperatuur in het koudwaterreservoir (blauwe emmer)
- De watertemperatuur in het warmwaterreservoir (rode emmer)
- Het stroomverbruik van de compressor (watt, W)
- Het elektrische werk uitgezet tegen de tijd (wattuur, Wh)
- De gebruikte elektrische energie per minuut ($J_{(el)}$)
- De thermische energie die per minuut aan het warmtereservoir wordt toegevoegd ($J_{(th)}$)
- De huidige prestatiecoëfficiënt als quotiënt van ($J_{(th)}/J_{(el)}$)

Meetprotocol

Experimenteel zuur 30 minuten

Water: 2 x 4 liter, begintemperatuur in beide vaten ca. 10 °C

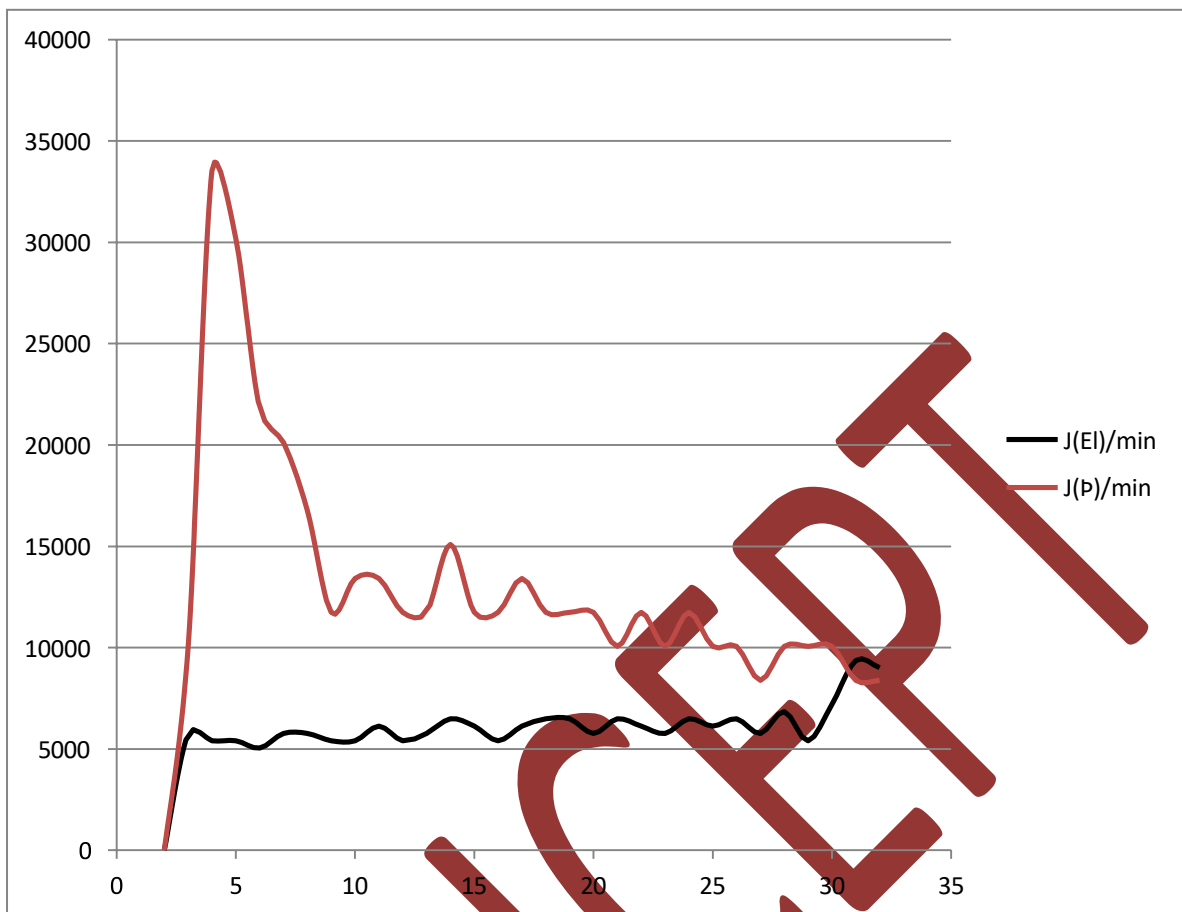
Massawater (warmtereservoir)	4000 g
Uitgangstemperatuur K (koudwaterreservoir)	10,1 °C
Uitgangstemperatuur H (warmwaterreservoir)	10,6 °C
Eindtemperatuur K (koudwaterreservoir)	-1,6 °C
Eindtemperatuur H (warmwaterreservoir)	34,5 °C

Tijd (min)	T °C (K)	T °C (H)	Compressor (W)	Energie (Wh)	\dot{Q} (Wh)	J(el)/min	J(th)/min	Prestatiecoëfficiënt ϵ
0	10,1	10,6	96	0	0	0	0	-
1	9,9	11,2	93	1,6	1,6	5760	10056	1,7
2	8	13,2	93	3,1	1,5	5400	33520	6,2
3	7,4	15	93	4,6	1,5	5400	30168	5,6
4	6,7	16,3	94	6	1,4	5040	21788	4,3
5	6,2	17,5	94	7,6	1,6	5760	20112	3,5
6	5,7	18,5	95	9,2	1,6	5760	16760	2,9
7	5,2	19,2	96	10,7	1,5	5400	11732	2,2
8	4,8	20	95	12,2	1,5	5400	13408	2,5
9	4,4	20,8	97	13,9	1,7	6120	13408	2,2
10	3,7	21,5	98	15,4	1,5	5400	11732	2,2
11	3,1	22,2	100	17	1,6	5760	11732	2,0
12	2	23,1	101	18,8	1,8	6480	15084	2,3
13	0,8	23,8	101	20,5	1,7	6120	11732	1,9
14	0,3	24,5	101	22	1,5	5400	11732	2,2
15	0	25,3	101	23,7	1,7	6120	13408	2,2
16	-0,2	26	102	25,5	1,8	6480	11732	1,8
17	-0,4	26,7	103	27,3	1,8	6480	11732	1,8
18	-0,5	27,4	102	28,9	1,6	5760	11732	2,0
19	-0,7	28	102	30,7	1,8	6480	10056	1,6
20	-0,7	28,7	104	32,4	1,7	6120	11732	1,9
21	-0,9	29,3	103	34	1,6	5760	10056	1,7
22	-1	30	104	35,8	1,8	6480	11732	1,8
23	-1	30,6	104	37,5	1,7	6120	10056	1,6
24	-1,2	31,2	104	39,3	1,8	6480	10056	1,6
25	-1,2	31,7	104	40,9	1,6	5760	8380	1,5
26	-1,3	32,3	104	42,8	1,9	6840	10056	1,5
27	-1,5	32,9	104	44,3	1,5	5400	10056	1,9
28	-1,5	33,5	105	46,3	2	7200	10056	1,4
29	-1,6	34	105	48,9	2,6	9360	8380	0,9
30	-1,8	34,5	105	49,6	2,5	2520	8380	0,9
	T_{K} -11,9°C	T_{H} 23,9°C				SOM(el)	SOM	QUOTIËNT
						178560	400564	2,2

De gemiddelde prestatiecoëfficiënt is 2,2. Dit betekent dat er slechts half zoveel elektrische energie wordt geïnvesteerd als de energie die door het water wordt geabsorbeerd zou suggereren. In de reeks metingen wordt echter duidelijk dat de prestatiecoëfficiënt tegen het einde van de test afneemt.

Curven voor het elektriciteitsverbruik ($J_{(el)}/min$) weergegeven door EXCEL

en warmtewinst ($J_{(th)}/min$)

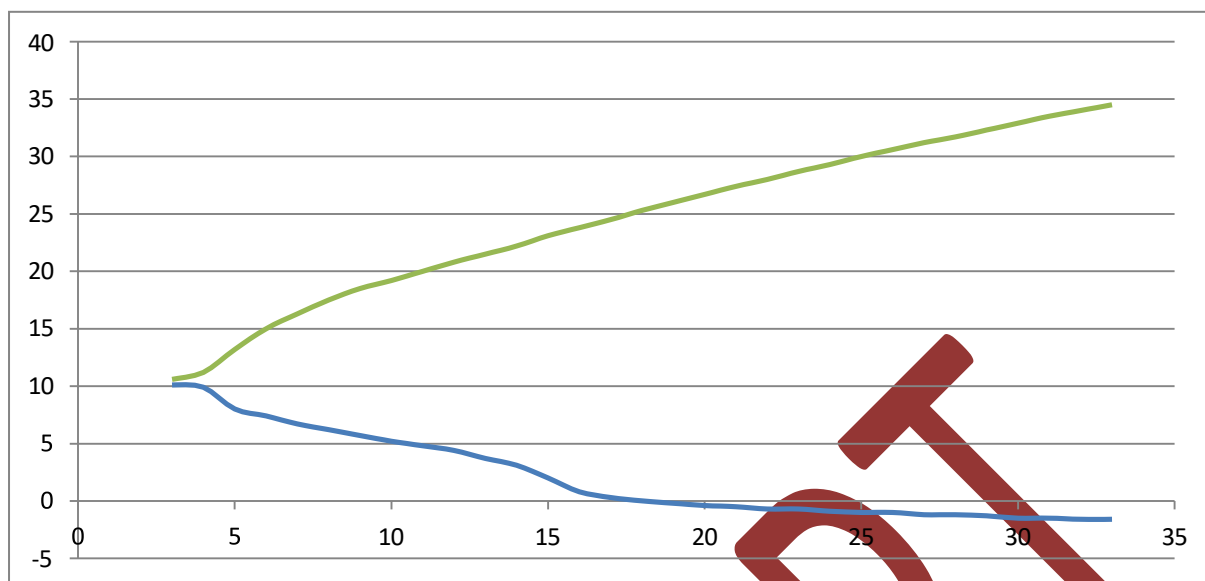


Prestatiecoëfficiënt als gevolg van het quotiënt ($J_{(th)}/min$) / ($J_{(el)}/min$), dat in de loop van de tijd afneemt



Temperatuurontwikkeling in het rood of blauwe emmer

Het is goed om te zien dat beide curves in de loop van de tijd vlakker worden (afnemende prestatiecoëfficiënt)



Wat geven de twee manometers aan?

De twee manometers die aan de bovenkant zijn gemonteerd, meten de druk van het koudemiddel, links (6) na het passeren van het expansieventiel (lagedrukzijde) en rechts (7) na het passeren van de compressor (hogedrukzijde).

De druk waaronder het koudemiddel zich bevindt, bepaalt de temperatuur van het kookpunt: het kookpunt van water r bij normale druk op zeeniveau is bijvoorbeeld 100 °C, op de Mount Everest slechts bij 70 °. Tetrafluorethaan is gasvormig bij normale temperaturen en wordt onder druk vloeibaar gemaakt. Daarom is het beter om te praten over het **dauwpunt** in plaats van de kooktemperatuur. Het dauwpunt is de temperatuur waarbij een gas in vloeibare toestand verandert (condenseert).

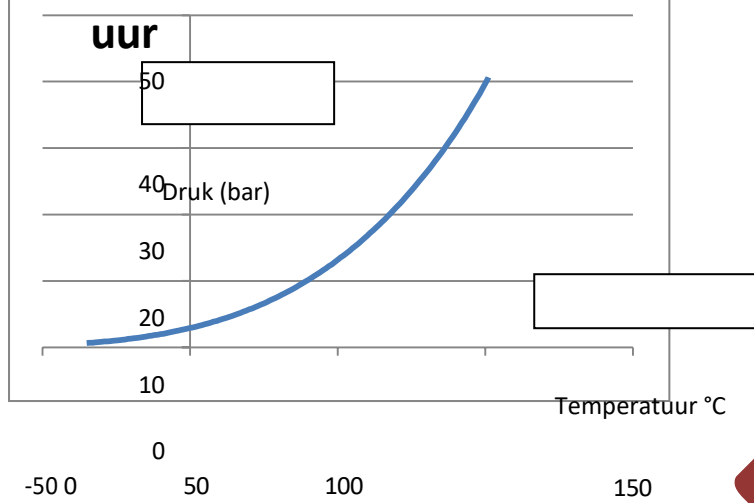
Voor het koelmiddel tetrafluorethaan (R134a) verwijst de gespecificeerde kooktemperatuur -26,3 °C naar 1013 hPa-druk, die eenmaal wordt gelijkgesteld met 0 en eenmaal met 1 bar in de volgende dampdruktabel omdat de twee manometers verschillend zijn: aanduiden.

Dampspanningstabel R134a

Temperatuur	Een druk (1013 hPa = 0 bar)	B Druk (1013 hPa = 1 bar)
-40 °C	-0,49	0,51
-30 °C	-0,16	0,84
-20 °C	0,32	1,32
-10 °C	1,00	2,00
0 °C	1,92	2,92
+10 °C	3,13	4,13
+20 °C	4,70	5,70
+30 °C	6,70	7,70
+40 °C	9,10	10,10
+50 °C	12,11	13,11
+60 °C	15,72	16,72
+70 °C	20,05	21,05
+80 °C	25,21	26,21
+90 °C	31,34	32,34

Bron: Koudemiddeldrukcalculator, <http://www.csgnetwork.com/r134apresstempconv.html>

R134 Tetrafluorethaan Dampspanning/temperat



Herkomst van de gegevens:

<http://www.deka-controls.com/kaeltemittel-dampftafeln.html>

Grafische kaart: Ingo Mennerich



Manometer hogedrukzijde

Buitenste zwarte schaal:
Druk van het koudemiddel in bar

1 bar = 100 kPa (P = Pascal)
Meetbereik 0 - 34 bar

Binnenste blauwe schaal:
Dauwpunttemperatuur voor koudemiddel R-134a

De andere schalen verwijzen naar
dauwpunttemperaturen van andere
koudemiddelen!

In het getoonde geval is de druk 5 bar en de
(drukafhankelijke) dauwpunttemperatuur* 20 °C.



*) Het dauwpunt is de temperatuur waarbij een stof in
gasvormige toestand overgaat in de vloeibare fase en vice versa.

Manometer lagedrukzijde

Buitenste zwarte schaal:
(Over) Druk van het koudemiddel in bar
De normale atmosferische druk van 1 bar is hier
gelijk aan "0"

1 bar = 100 kPa (P = Pascal)
Meetbereik -1 - 8 bar

Binnenste blauwe schaal:
dauwpunttemperatuur voor
koudemiddel R-134a

De andere schalen verwijzen naar
dauwpunttemperaturen van andere
koudemiddelen!

In het getoonde geval is de
Druk 4,4 bar en de (drukafhankelijke)
dauwpunttemperatuur* 18°C

CONCEPT

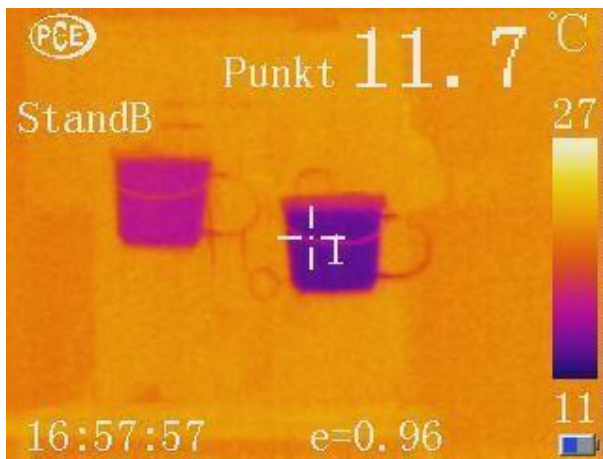
Wanneer de warmtepomp wordt ingeschakeld, neemt de druk aan de hogedrukzijde toe, terwijl deze aan de lagedrukzijde afneemt.

- De compressor zorgt ervoor dat de druk toeneemt,
- Het expansieventiel verlaagt de druk.

Als u de temperatuur meet bij de aansluiting van de manometers, kunt u een uitspraak doen over de vraag of het koudemiddel op dit punt vloeibaar (temperatuur onder het dauwpunt weergegeven op de manometer) of gasvormig (temperatuur boven het dauwpunt) is.

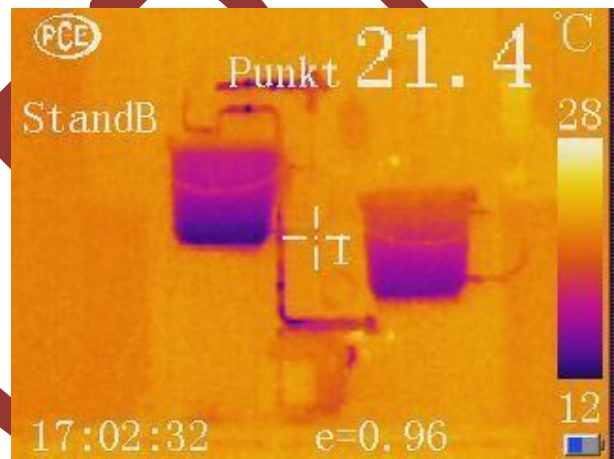
Warmtepomp ontmoet warmtebeeldcamera

Met de warmtebeeldcamera (die bij ons geleend kan worden), kunt u de voor ons onzichtbare warmtestraling (infraroodstraling) visualiseren en in valse kleuren volgen hoe warmte van de "koude" kant naar de "warme" kant wordt gepompt:



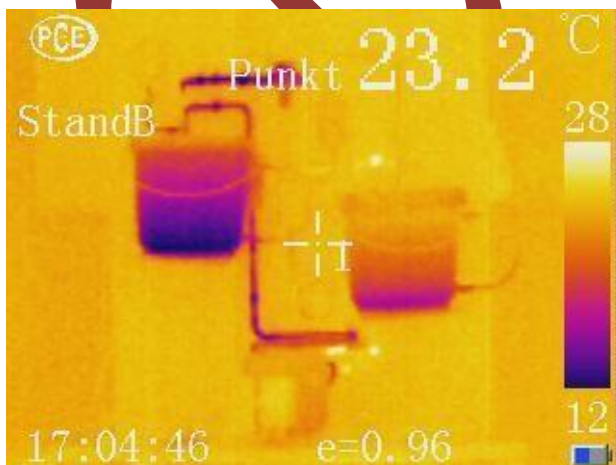
Start van het experiment

Het water in beide emmers is koud. Die in de juiste emmer nog kouder (11,7°C)
Alle leidingen zijn op kamertemperatuur.



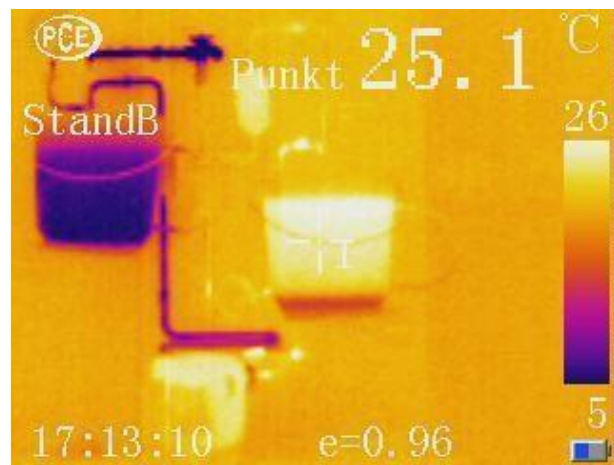
Na 5 minuten

Het water in de juiste emmer wordt warmer. In beide emmers is een temperatuurstratificatie te zien : koud water is zwaarder! Van het expansieventiel tot de compressor wordt de pijpleiding aanzienlijk kouder. Kamertemperatuur (en temperatuur van het model) 21.4°C



Na 10 minuten

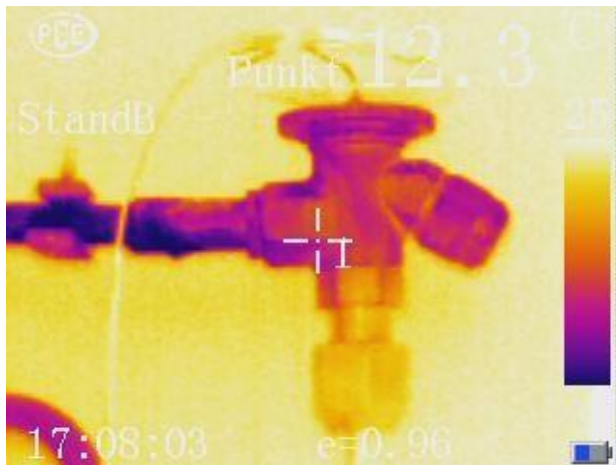
In de juiste emmer wordt het water steeds warmer



Na 15 minuten

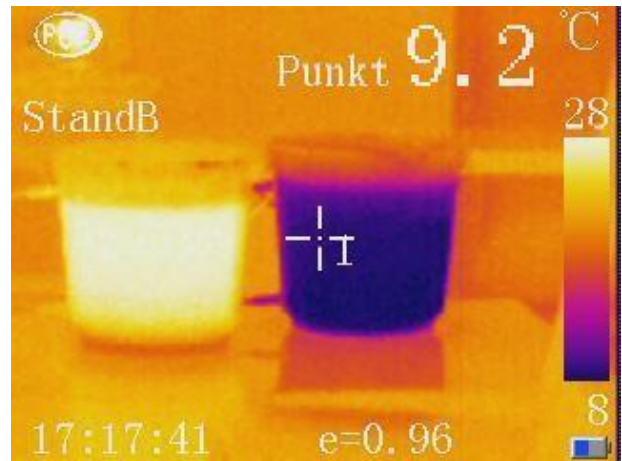
Het water in de linker emmer is gedaald tot temperaturen onder de 10°C (zie kleurenschaal). Het water in de rechter Emmer is meer dan 25°C warm.

Details van de warmtepomp in infrarood :



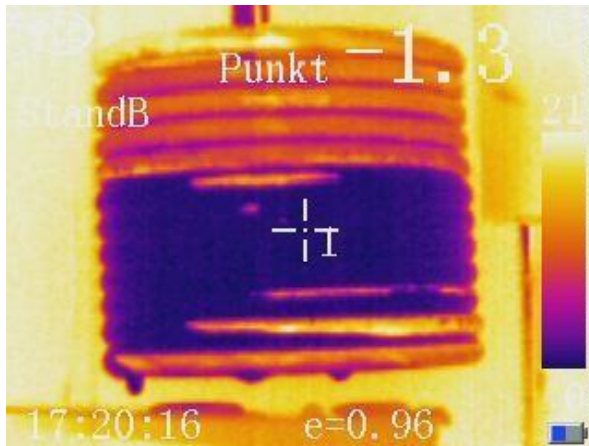
Temperaturen bij het expansieventiel

Het warme koudemiddel komt van onderaf binnen en wordt op weg naar links abrupt afgekoeld

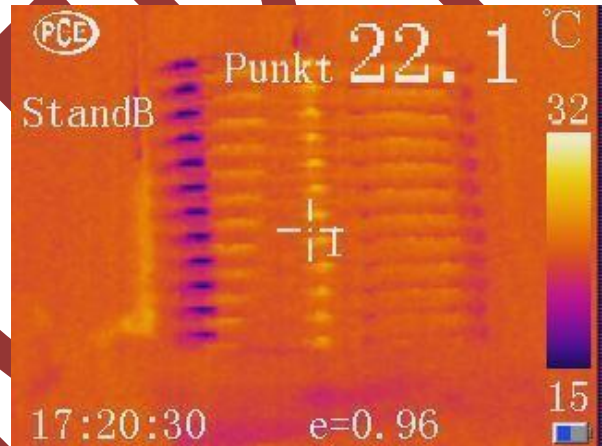


Het resultaat na 20 minuten:

9,2°C koud water en warm water met meer dan 28°C!



Verdamper (na het verwijderen van de emmer)



Condensator (na het verwijderen van de emmer)

Foto: Ingo Mennerich

Verdere experimenten met de warmtepomp

Handhaving van de temperatuur van het water in het "koudwaterreservoir"

- Naarmate het temperatuurverschil tussen de "koude" en "warmwaterreservoirs" toeneemt, neemt de efficiëntie (prestatiecoëfficiënt) toe. Wat gebeurt er als je de watertemperatuur in de blauwe emmer constant houdt door af te schuimen en nieuw water toe te voegen?
- Kan dit worden geoptimaliseerd met een pompaangedreven koelwaterinstroom?

Hoe ver kan het temperatuurverschil tussen "koud" en "warm" nuttig gaan?

Hoe gedraagt het systeem zich als het warme water wordt gecirculeerd in een "verwarmingssysteem" bestaande uit een slang die is aangesloten op de emmer en een aquariumfilterpomp?

Op welke temperatuur kun je het warme water brengen als je de emmer isoleert? Probeer het niet uit: waarom kan het systeem niet "waterloos" worden bediend?

Experimenten rond warmtepompen

Warmte-extractie door verdamping (verdamping)

- Als u de sensor van een thermometer in water houdt dat dezelfde temperatuur heeft als de omgeving en deze vervolgens aan de lucht laat drogen, zal de weergegeven temperatuur een paar graden onder de eerder aangegeven temperatuur van het water liggen. De reden: Het restwater op de sensor verdampt en onttrekt warmte aan de sensor.
- Als je diepvriespizza in een vochtige doek of krant wikkelt, blijft het langer koud.
- In India is er een eenvoudige "koelkast": een pot met verbrande klei, eerder gemengd met strodeeltjes, is gevuld met water. Bij het branden laat het stro gaten achter zodat de klei poreus wordt. Het ontsnappende water verdampt op het oppervlak van de pot en onttrekt warmte aan de omgeving. Als je voedsel (bijvoorbeeld in een buit) in het water legt, blijft het koud.
- Een eenvoudigere versie van de "Indiase koelkast": een bekersglas gevuld met water wordt gewikkeld in een handdoek, die gedeeltelijk in het water wordt ondergedompeld.

Drukverhoging en verwarming door comprimeren of:

- Het opblazen van een fietsbuis kost energie ("spierkracht"). De energie die in de spieren wordt gestoken wordt slechts gedeeltelijk omgezet in beweging, de rest komt vrij als warmte.
- Ook de luchtpomp, klep en slang worden warm: de luchtdeeltjes worden (tegen hun "wil") samengeperst in een besloten ruimte. Hierdoor ontstaat compressiewarmte. De klep is gemaakt van metaal en metaal is een goede geleider van warmte. De warmte in de rook valt minder op, omdat deze een relatief groot oppervlak heeft waarover de warmte snel wordt afgevoerd.
- Als je met je duim stevig op de opening van de pomp drukt en snel en krachtig pompt, kun je blaren op je duim krijgen. In de luchtpomp worden temperaturen van meer dan 100°C gegenereerd!

Liquefactie onder hoge druk:

- Onder druk wordt waterdamp vloeibaar: Een snelkookpan zorgt ervoor dat water dat kookt bij normale druk bij 100 °C vloeibaar blijft, zelfs bij temperaturen boven 100 °C. Daardoor kookt de inhoud sneller.

Drukverlaging door middel van een expansieventiel:

- Wanneer een gas uit een drukcilinder stroomt, koelt het aanzienlijk af
- Als je de klep van een uitpuilende fietsbuis opent, wordt het koud - net als de lucht die eruit stroomt. De luchtdeeltjes die eerder in de slang werden samengeperst (en verwarmd) krijgen hun "vrijheid" terug.

Verdamping onder lage druk:

- Op hoge bergen (d.w.z. bij lagere luchtdruk) kookt water bij temperaturen onder de 100°C. Met een vacuümpomp kun je in een gesloten glazen vat zoveel onderdruk creëren dat water zelfs bij temperaturen ver onder de 100°C kookt.
- Als je een melkfles (voorzichtig) tot de rand vult (!) vult met kokend water en sluit goed met de schroefdop, het water kookt nog steeds bij kamertemperatuur. De reden hiervoor is dat het koelwater minder ruimte inneemt. Hierdoor ontstaat een lege, steeds groter wordende ruimte ("vacuüm") tussen het wateroppervlak en het deksel.