
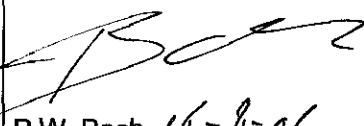
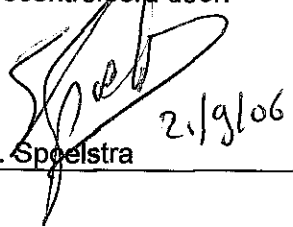



Vaste stof-damp sorptiekoeling

Warmte gebruiken om koeling te maken

R. de Boer

Gepubliceerd in Verwarming en Ventilatie, april, (2005), 302-307

Revisie		
A	14 maart 2006; concept versie	
B	13 juli 2006; definitieve versie	
Gemaakt door:	Goedgekeurd door:	ECN Energie Efficiency in de Industrie Industriële Warmtehuishouding
 R. de Boer	 P.W. Bach 16-8-06	
Gecontroleerd door:	Uitgegeven door:	
 S. Spoelstra 21/9/06	 P.T. Alderliesten	

Juli 2006

Verantwoording

Op verzoek van de redactie van het tijdschrift Verwarming en Ventilatie+ is er voor het themanummer over koeling (april 2005) door ECN een bijdrage gemaakt over Sorptiekoeling.

Abstract

This report describes the technology of solid sorption cooling, its potential advantages over conventional cooling technology, the present status, and recent developments.

Inhoud

Lijst van figuren	4
Samenvatting	5
1. Wat is sorptiekoeling	6
2. De werking	7
3. De voordelen van sorptiekoeling	10
4. Huidige status van vaste stof-damp sorptiekoeling	11
5. Ontwikkelingen	12
6. Vooruitblik	15
Referenties	16
Nomenclature	16

Lijst van figuren

Figuur 2.1	<i>Schematische weergave van de warmtestromen in een sorptiekoelmachine</i>	7
Figuur 2.2	<i>Opbouw van een adsorptie koelmachine (ref.:Caddett)</i>	8
Figuur 2.3	<i>Weergave van de warmtestromen in een cyclus van een silicagel water sorptiesysteem</i>	8
Figuur 4.1	<i>Commercieel verkrijgbare adsorptiekoelmachines van de firma Nishiyodo (links) en Mayekawa (rechts). (bron www.adsorber.de)</i>	11
Figuur 5.1	<i>Weergave van de zeoliet-water vaste stof-damp sorptiewarmtepomp. (bron www.vaillant.de)</i>	12
Figuur 5.2	<i>Foto van het prototype van de SWEAT vaste stof-damp sorptiekoelmachine</i>	13
Figuur 5.3	<i>Foto van de SOCOOL testinstallatie</i>	14

Samenvatting

Dit document geeft een overzicht van de werking van vaste-stof damp sorptiekoeling, de potentiële voordelen ten opzichte van meer conventionele koeltechnieken. Daarnaast wordt de huidige status van de technologie beschreven en wordt kort ingegaan op recente ontwikkelingen.

1. Wat is sorptiekoeling

Sorptiekoeling is een techniek waarbij warmte wordt gebruikt om koude te maken. Daarmee is direct het grootste onderscheid aangegeven ten opzichte van het veelvuldig toegepaste alternatief: compressiekoeling. Deze laatste gebruikt mechanische energie om koude te maken. Zowel bij sorptiekoeling als bij compressiekoeling doorloopt het koudemiddel een cyclus waarbij het bij hoge druk en temperatuur condenseert en bij lage druk en temperatuur weer verdampt. Het benodigde drukverschil om condensatie en verdamping te laten plaatsvinden wordt bij compressiekoeling door de compressor geleverd. Bij sorptiekoeling wordt het drukverschil met thermische compressie gecreëerd.

Een voorbeeld van sorptiekoeling is het lithiumbromide-water (LiBr-H₂O) systeem, waarbij water als koudemiddel fungeert en de LiBr-oplossing het sorptiemiddel is. Een ander voorbeeld van sorptiekoeling is de geruisloze camping- en hotelkamer-koelkast die op basis van ammoniak-water (NH₃-H₂O) werkt. Hier is ammoniak het koudemiddel dat in het water wordt geabsorbeerd. Ook grote industriële sorptiekoelmachines werken op basis van dit stoffenpaar.

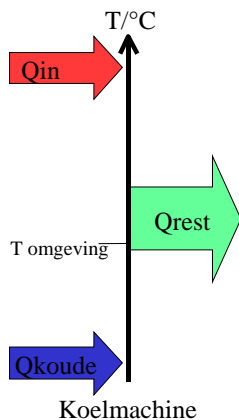
Naast de genoemde sorptiekoelsystemen op basis van absorptie van een koudemiddel in een vloeistof zijn er ook sorptiekoelers die gebruik maken van sorptie in een vaste stof. In dit artikel wordt dieper ingegaan op het werkingsprincipe van vaste stof-damp sorptiekoeling, de potentiële voordelen, een aantal toepassingsvoorbeelden en enkele recente ontwikkelingen op dit gebied.

2. De werking

Het principe van vaste stof-damp sorptiekoeling is als volgt: als start van het proces is er een koudemiddel, bijvoorbeeld water, dat gebonden is aan een sorbent. Omdat het systeem geen overige gassen bevat wordt de druk veroorzaakt door de dampspanning van het koudemiddel. Bij verhoging van de temperatuur van het sorbent wordt de dampspanning van het koudemiddel verhoogd en kan het elders in het systeem gecondenseerd worden. Bij afkoeling van het sorbent gaat de druk omlaag en kan het omgekeerde proces plaatsvinden. Het koudemiddel verdampt en wordt in het sorbent opgenomen. Door een slimme uitvoering van dit cyclische proces kan je een koelmachine maken die in feite wordt aangedreven door de drukverhoging van het koudemiddel als gevolg van de temperatuurverhoging van het sorbent. Vandaar de naam "thermische compressie".

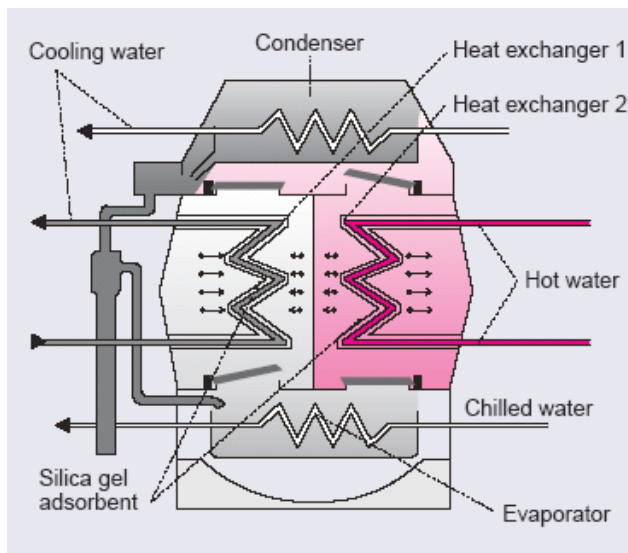
Het werkingsprincipe van een vaste stof-damp sorptiekoelmachine is vergelijkbaar met de werking van een LiBr absorptiekoelmachine. In een LiBr sorptiekoelmachine wordt het sorptiemiddel, de LiBr oplossing, rondgepompt. In een vaste stof-damp sorptiemachine is het vaste sorbent gefixeerd rondom een warmtewisselaar. Het sorbent wordt nu afwisselend via deze warmtewisselaar opgewarmd en afgekoeld.

In Figuur 2.1 zijn schematisch de warmtestromen en hun relatieve temperatuurniveaus weergegeven die in een sorptiekoelsysteem optreden. De warmtestroom die bij hoge temperatuur wordt toegevoerd (Q_{in}) levert de drijvende kracht om de warmtestroom bij lage temperatuur (de koudeproductie Q_{koude}) op te wekken. De aan de machine toegevoerde warmte wordt bij omgevingstemperatuur weer afgevoerd (Q_{rest}).



Figuur 2.1 *Schematische weergave van de warmtestromen in een sorptiekoelmachine*

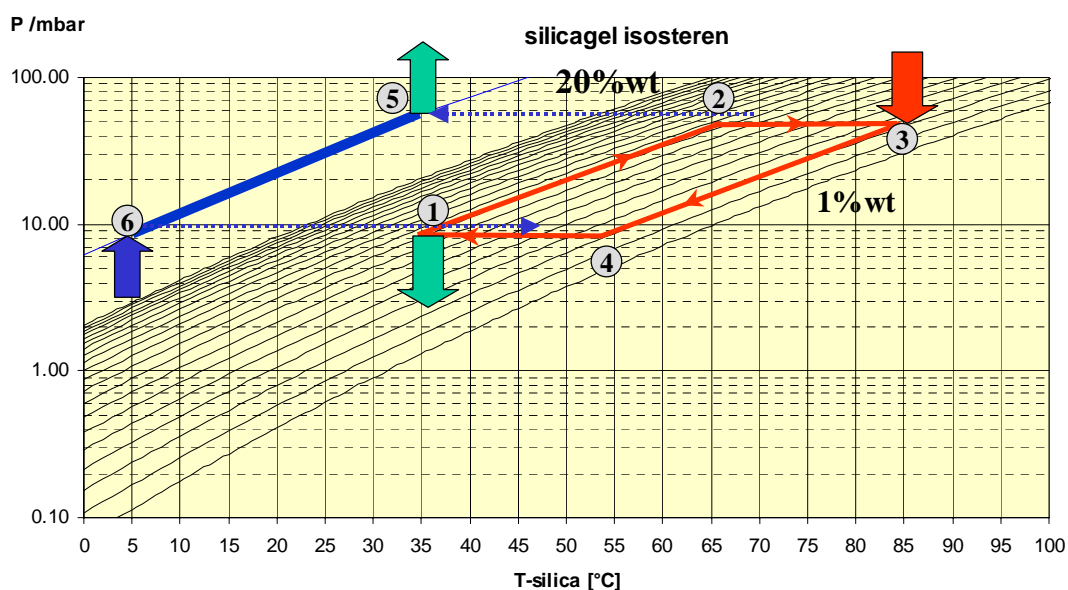
Figuur 2.2 toont de opbouw van een vaste stof-damp sorptie koelsysteem op basis van silicagel met water. Hierin zijn twee afzonderlijke silicagel warmtewisselaars (heat exchanger 1 en 2) geplaatst, die via kleppen in verbinding staan met een condensor en een verdamper. De condensor en één van de twee warmtewisselaars worden met koelwater doorstroomd. De andere warmtewisselaar wordt met heet water doorstroomd, en de verdamper met het koudwater circuit. Voor het verkrijgen van een continu proces worden de silicagel warmtewisselaars in tegenfase afwisselend met heet water en met koelwater doorstroomd.



Figuur 2.2 *Opbouw van een adsorptie koelmachine (ref :Caddett)*

Als warmtebron voor een dergelijke koelmachine is water met een temperatuur tussen 60 en 90°C nodig. Dit kan afkomstig zijn van een warmtekracht installatie, restwarmte uit industriële processen, maar ook warmte van een zonnecollector kan hiervoor worden ingezet. Voor het koelwatercircuit (25-30°C) wordt doorgaans een natte koeler toegepast en koude wordt geleverd vanaf 6°C en hoger.

Om de werking van het vaste stof-damp sorptieproces op basis van silicagel in meer detail te benaderen is in Figuur 2.3 een isosteren diagram van silicagel weergegeven. Het diagram geeft de druk-temperatuur evenwichtslijnen van silicagel weer voor verschillende watergehalten. Silicagel is een sterk hygroscopisch materiaal, trekt dus water aan. In volledig verzadigde toestand kan het rond 35 gewichtsprocent water opnemen. Uit het diagram is middels de zwarte lijnen af te lezen welke waterdampspanning er hoort bij silicagel op een bepaalde temperatuur en met een bepaald watergehalte. Met de rode lijnen is een cyclus weergegeven die door een silicagel-water systeem wordt doorlopen.



Figuur 2.3 *Weergave van de warmtestromen in een cyclus van een silicagel water sorptiesysteem*

In het diagram van Figuur 2.3 is tevens de kooklijn van water weergegeven (blauwe lijn) en zijn de warmtestromen van Figuur 2.1 (dikke pijlen) toegevoegd. Om met warmte koude te maken wordt het volgende proces doorlopen. Beginnend bij 1 wordt een hoeveelheid silicagel met zo'n 10% gebonden water opgewarmd van 35 naar 85°C. Tijdens deze opwarming neemt de druk geleidelijk toe tot punt 2 waar de waterdampspanning boven de silicagel hoger is dan de dampspanning bij de condensortemperatuur. Nu zal er waterdamp van de silicagel naar de condensor stromen (5) en warmt de silicagel verder tot punt 3 op onder afgifte van waterdamp (desorptie). De silicagel bevat nu nog slechts 3% water en wordt vervolgens weer in temperatuur verlaagd. De druk gaat daarbij omlaag tot punt 4 is bereikt waarbij waterdamp afkomstig uit de verdamper (6) wordt opgenomen in de silicagel (adsorptie). De opname gaat door totdat (1) is bereikt, waarna het beschreven proces weer wordt herhaald.

In deze cyclus is er dus een fase waarin de silicagel wordt geregenereerd (1→3) en waarbij geen koeling wordt geproduceerd. Alleen in de afkoelfase van de silicagel (3→1) kan waterdamp uit de verdamper worden aangetrokken en wordt er koude gemaakt. Dit batchproces wordt continu gemaakt door de twee batches met silicagel in tegenfase te bedrijven.

3. De voordelen van sorptiekoeling

Voor sorptiekoeling in het algemeen is geen mechanische energie of elektriciteit nodig om het primaire proces aan te drijven. Er wordt alleen elektriciteit gebruikt voor het rondpompen van de benodigde vloeistofcircuits. Daar waar de infrastructuur voor elektriciteit nog tekort schiet of waar gebruik van compressiekoelers tot een piek-elektriciteitsgebruik leidt die hoge kosten met zich mee brengt, kan sorptiekoeling een aantrekkelijk alternatief zijn. Nog beter wordt het wanneer op locatie een warmteoverschot aanwezig is waarmee de koelmachine kan worden aangedreven. Dit kan het geval zijn bij WarmteKracht installaties die zomers onvoldoende afzet voor de geproduceerde warmte hebben, wat het bedrijven ervan minder rendabel maakt. Het plaatsen van een sorptiekoeler kan dan juist voor de exploitatie van een WK-installatie gunstig zijn vanwege het nuttig gebruik van de warmte tijdens de zomerperiode. Inzet van sorptiekoeling kan hier leiden tot besparing op energiegebruik en daarmee ook een besparing op de kosten. Ook de mogelijkheid die sorptiekoeling biedt om uit zonnewarmte koeling te produceren is voor toepassing in de gebouwde omgeving zeer aantrekkelijk omdat warmteaanbod en koudevraag meestal gelijktijdig optreden. Bovendien produceert een zonnecollectorsysteem op warme dagen meer warmte dan voor warm tapwater noodzakelijk is. Deze warmte kan prima benut worden om koeling te maken.

Andere voordelen van sorptiekoeling zijn dat er geen HFK of HCFK koudemiddelen worden gebruikt die door lekkages een sterke bijdrage aan de broeikasgas uitstoot hebben. Omdat bij sorptiekoeling geen compressor aanwezig is, zal het ook minder geluidsproblemen kunnen veroorzaken, en omdat er vrijwel geen bewegende delen in het systeem zal slijtage en onderhoud minder zijn.

Vaste stof-damp sorptie heeft ten opzichte van LiBr-absorptie systemen nog het voordeel dat ook bij aandrijftemperaturen beneden 80°C en bij bedrijf in deellast de prestaties op een acceptabel niveau blijven. Dit maakt vaste stof-damp sorptiekoeling een aantrekkelijke optie voor zongedreven koelsystemen.

4. Huidige status van vaste stof-damp sorptiekoeling

Op dit moment zijn er twee fabrikanten van vaste stof-damp koelmachines, Nishiyodo en Mayekawa, beide uit Japan. Hun machines werken op basis van silicagel en water. In Figuur 4.1 zijn foto's te zien van beide machines.



Figuur 4.1 *Commercieel verkrijgbare adsorptiekoelmachines van de firma Nishiyodo (links) en Mayekawa (rechts). (bron www.adsorber.de)*

Van deze machines zijn er wereldwijd ongeveer 200 geplaatst. Het merendeel daarvan staat in Japan, waar Nishiyodo al in 1986 de eerste machines heeft geleverd. De koelcapaciteit varieert tussen 70 en 1000 kW, de COP ligt rond 0,6 en de prijs varieert van meer dan 1000 tot 500 €kW_{koude}. In Duitsland staan momenteel ongeveer 20 van deze adsorptiekoelsystemen, bij kantoren ziekenhuizen, winkelcentra en overheidsgebouwen. Zij worden aangedreven met stads-warmte, warmte van een WK-systeem, en in een enkel geval ook met zonnewarmte. Omdat de inzet van deze vaste stof-damp sorptiekoelers in het Europa nog relatief nieuw is, wordt er vaak uitgebreid gemonitord. De ervaringen die er tot nu toe mee zijn opgedaan, hebben betrekking op de systeemintegratie, het gebruik van buffers, temperatuurregelingen en aanpassing van de cyclustijden van de adsorptiekoeler bij deellast bedrijf om de efficiency te verhogen.

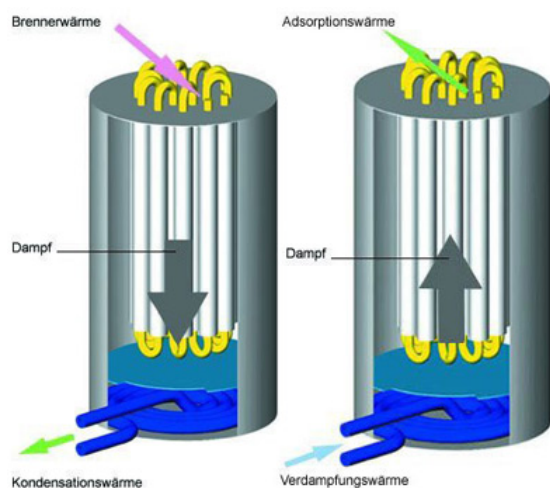
5. Ontwikkelingen

De toenemende vraag naar comfortkoeling en airconditioning en de gevolgen daarvan op directe en indirecte bijdrage aan broeikasgasuitstoot creëert een toenemende vraag naar alternatieven voor conventionele compressiekoeling. Hoge kosten voor piek elektriciteitsvraag vormt ook aanleiding tot het zoeken naar alternatieven alsook de ontwikkeling van direct met zonnewarmte gedreven koelsystemen. Warmtegedreven koeling staat momenteel ook in de belangstelling vanwege de verwachte uitfasering van enkele HFK koudemiddelen die in compressiekoelers worden toegepast. Voornamelijk voor koelsystemen kleiner dan 50 kW_k waren er tot voor kort vrijwel geen aantrekkelijke alternatieven voor compressiekoeling. In deze categorie zijn er nieuwe ontwikkelingen op het gebied van warmtegedreven koeling. Hieronder worden een aantal van deze ontwikkelingen kort beschreven.

Aanpassingen in het ontwerp van de bestaande grootschalige vloeistof absorptiekoelers en downsizing vanaf 50 kW_k hebben ertoe geleid dat sinds kort een 15 kW_k LiBr absorptiekoeler van de firma EAW commercieel verkrijgbaar is, die ook bij lagere aandrijftemperaturen nog redelijke koelprestaties geeft. De COP varieert tussen 0,5 tot 0,7 en de prijs bedraagt 15000 €

Op het gebied van vaste stof-damp sorptiekoeling is de firma Sortech AG in Duitsland bezig met de ontwikkeling van een 10 kW_k sorptie koeler op basis van silicagel en water die tevens een warmtepompfunctie voor verwarmingsdoeleinden heeft. De eerste prototypes van dit systeem worden momenteel in veldtests beproefd. Naast stationaire toepassing wordt ook gewerkt aan mobiele toepassing van dit concept in transportkoelsystemen.

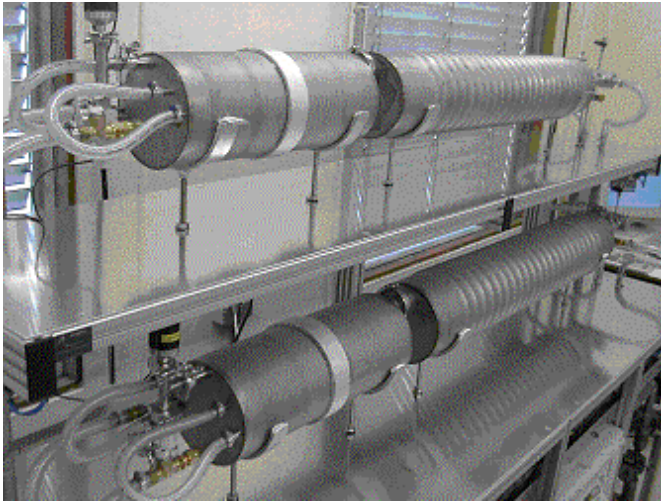
Vaillant is samen met de RWTH Aachen al enkele jaren bezig met de ontwikkeling van een warmtepomp op basis van zeoliet-water. Deze ontwikkeling is gericht op de toepassing van vaste stof-damp sorptietechnologie voor verwarmingstoepassing. Het Vaillant systeem is bedoeld als gasgestookte warmtepomp waarmee een rendement van 135% zou kunnen worden gehaald (zie Figuur 5.1). Hoewel het hierbij gaat om een toepassing als warmtepomp is de technologie vergelijkbaar met die voor vaste stof-damp sorptiekoeling.



Figuur 5.1 Weergave van de zeoliet-water vaste stof-damp sorptiewarmtepomp. (bron www.vaillant.de)

Bij ECN wordt op het gebied van vaste stof-damp sorptiekoeling gewerkt aan twee systeemuitvoeringen. Het eerste systeem maakt gebruik van natriumsulfide(Na_2S) -water als werkmedium. Dit stoffenpaar kenmerkt zich door een hoge energiedichtheid; een kilo natriumsulfide kan een

kilo water aan zich binden. Het water wordt daarbij in de zoutkristallen opgenomen waarbij veel warmte vrijkomt. Met dit systeem is het mogelijk warmte en koude voor langere termijn op te slaan. De ontwikkeling van dit systeem is met name gericht op toepassingen waarbij (rest-) warmteaanbod en koudevraag ongelijktijdig optreden, bijvoorbeeld in dag-nacht cycli. Het systeem kent een modulaire opbouw waarmee flexibiliteit ontstaat in afstemming van de systeemgrootte op een specifieke toepassing. De modulaire opbouw zal op langere termijn bij seriematige productie kostenvoordelen met zich mee brengen. Er is een functioneel prototype op basis van deze technologie opgezet (zie Figuur 5.2) waarmee de werking en prestaties onder gesimuleerde bedrijfscondities in het lab zijn aangetoond. Momenteel wordt gewerkt aan het opzetten van veldtests met dit systeem.



Figuur 5.2 Foto van het prototype van de SWEAT vaste stof-damp sorptiekoelmachine

De tweede ontwikkeling voor vaste-stof damp sorptiekoeling bij ECN is gericht op de integratie van een warmtegedreven koelsysteem met een kleine gasmotor als WarmteKracht systeem. In dit EU project met de naam SOCOOL ligt de nadruk op het verkrijgen van een sorptiekoelsysteem met een hogere vermogensdichtheid, waardoor de systemen compacter worden. Dit moet bereikt worden door verbetering van het warmte- en stoftransport in de vaste stof. Door snelle opwarming en afkoeling van vaste stof kan de afgifte en opname van damp sneller verlopen. Hierdoor kan met een kleinere hoeveelheid vaste stof een groter koeffect worden bereikt. In de loop van 2005 zal de testinstallatie (zie Figuur 5.3) bij ECN in het laboratorium worden beproefd, waarna deze in Italië in een demonstratieproject voor kleinschalige tri-generatie zal worden opgenomen.



Figuur 5.3 *Foto van de SOCOOL testinstallatie*

Naast de bovengenoemde systeemontwikkelingen wordt er bij diverse universiteiten en research instellingen onderzoek en ontwikkeling gedaan aan vaste stof-damp stoffenparen waarmee een hogere efficiency kan worden behaald. Ook op het gebied van integratie van de vaste stof in een warmtewisselaar en systeemuitvoeringen waarbij interne warmteterugwinning kan worden toegepast wordt veel R&D verricht, met als doel compactere koelsystemen met een hogere energie efficiency.

6. Vooruitblik

Toepassing van vaste stof-damp sorptiekoeling vindt nu plaats in industriële koelprocessen, en voor klimaatbeheersing en airconditioning in ziekenhuizen en kantoorgebouwen. De warmte om deze systemen aan te drijven is afkomstig van industriële restwarmte, warmtekracht of van de zon. De beste kansen voor deze koeltechniek zijn daar waar een warmteoverschot of een goedkope warmtebron aanwezig is. Voornamelijk zongedreven koeling daagt onderzoekers en ontwikkelaars uit om betaalbare koelsystemen te maken die met zonnewarmte goede koelprestaties leveren. De ontwikkelingen richten zich daarbij op systeemgroottes van zo'n 10 kW. De komende jaren zal het aantal kleinschalige warmtegedreven vaste stof-damp sorptiekoelsystemen dat in veldtests wordt beproefd verder toenemen, maar de verwachting is dat het nog zo'n 5 jaar zal duren voordat deze systemen commercieel beschikbaar zullen zijn.

Referenties

<http://www.adsorber.de/>

Caddett Energy Efficiency Newsletter 2000-1, 7-9

<http://www.eaw-energieanlagenbau.de>

<http://www.sortech.de>

<http://www.vaillant.de>

<http://www.ltt.rwth-aachen.de>

<http://www.sweatbv.nl>

<http://socool.ippt.gov.pl/>

Nomenclature

COP = Coefficient Of Performance. Dit is de verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheid koeling ten opzichte van de toegevoerde hoeveelheid warmte.