

Magnetisk køling

– køleteknologi med en varm

En stor del af verdens elektricitetsforbrug anvendes til køling. Der er derfor stort fokus på at nedbringe energiforbruget af køleskabe. Magnetisk køling, der udnytter, at visse materialer skifter temperatur, når de kommer ind i et magnetfelt, er et lovende og energieffektivt alternativ til den traditionelle køleteknologi.

Forfattere



Anders Smith,
chefkonsulent,
Institut for
Energikonver-
tering og -lagring, DTU.
ansm@dtu.dk



Christian Bahl,
seniorforsker,
Institut for
Energikonver-
tering og -lagring, DTU.
chrhb@dtu.dk

Nogle materialer skifter temperatur, når de kommer ind i et magnetfelt. Det kan man udnytte til at lave miljøvenlige og effektive alternativer til traditionelle køleskabe og varmepumper. Fænomenet, den såkaldte *magnetokaloriske effekt*, har været kendt i næsten 100 år. I mange år anvendte man kun effekten til at opnå ultralave temperaturer i laboratoriet, men fra 2000-tallet og frem har der været en voksende indsats for at udnytte fænomenet til køling ved mere almindelige temperaturer.

Et ganske almindeligt køleskab virker ved, at et kølemiddel med lavt kogepunkt skifter fase fra væske til damp og tilbage igen i en cyklisk proces. Når kølemidlet er på væskeform, er det koldt og kan optage varme fra det indre af køleskabet (som så afkøles). Efterhånden som kølemidlet optager varmen, fordamper væsken. En kompressor sammentrykker dampen under højt tryk, hvorved dampens temperatur stiger. På bagsiden af køleskabet kan dampen nu afgive sin overskydende varme til den omgivende luft. Under denne proces fortættes dampen til væske, der så passerer en ekspansionsventil, hvor trykket falder brat. Det sænker væskens temperatur (strengt taget fordamper en del af væsken samtidig, så der bliver tale om en kold blanding af væske og gas), og cyklussen kan begynde forfra. Kompressoren, som basalt set er en pumpe, har været anvendt i mere end 150 år til køling.

Magnetiske køleskabe

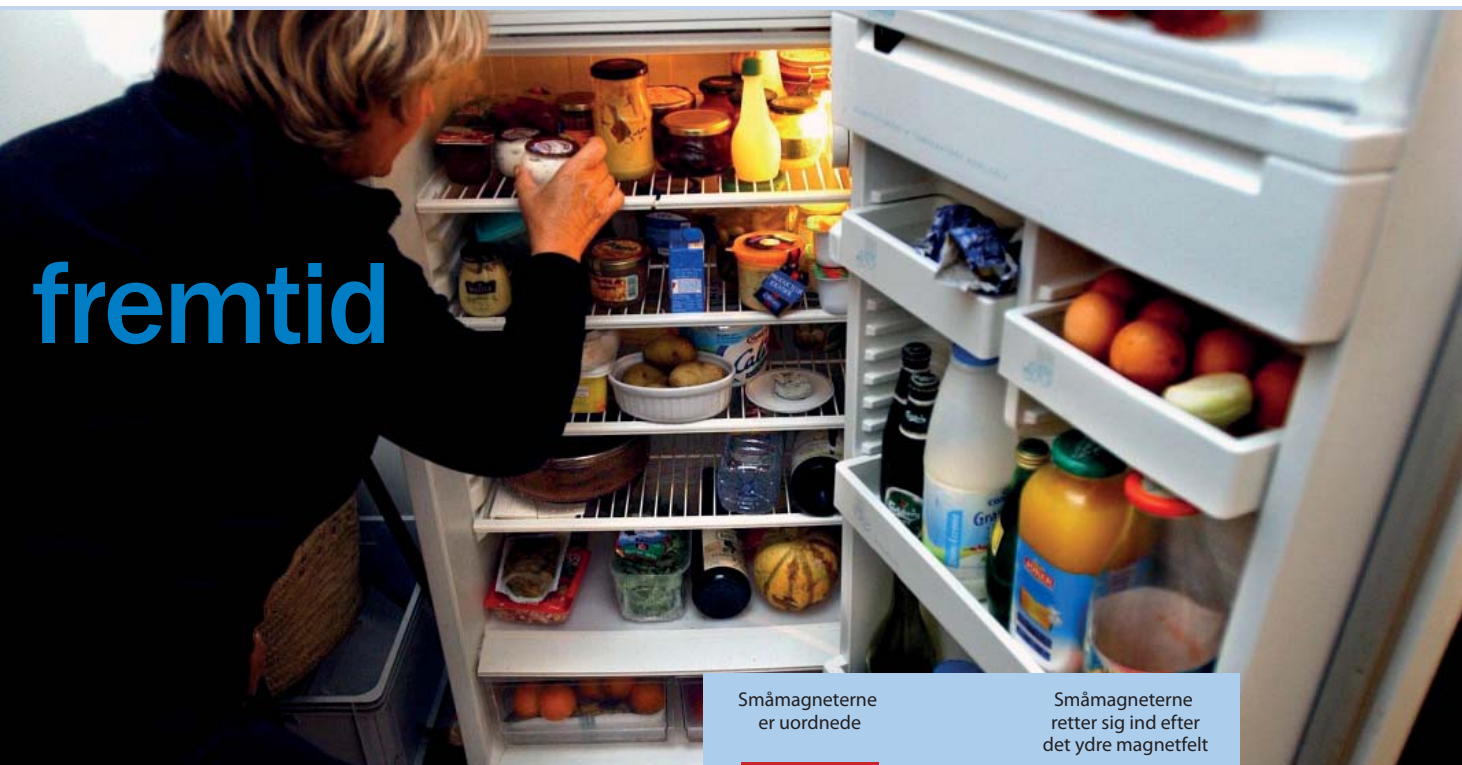
Effektiviteten af et køleskab er defineret som den mængde varme, der fjernes fra køleskabets indre i løbet af et vist tidsrum, divideret med den mængde arbejde (i form af elektricitet) man har tilført kom-

pressoren for at drive den. Hvis processerne i kølecyklussen er uden indre tab (sådanne processer kalder man reversible, da de kan forløbe lige godt i begge retninger), får man den højst opnåelige effektivitet. Der er imidlertid flere irreversible delprocesser i en kompressorcyklus. Den vigtigste skyldes den næsten fri udvidelse af væske-gas-blandingen efter ekspansionsventilen: Når en gas udvider sig frit, er det altid en irreversibel proces. Der er derfor en grænse for, hvor meget tabene i en kompressor kan reduceres. I modsætning hertil er den magnetokaloriske effekt reversibel: Temperaturen af et magnetokalorisk materiale, der kommer ind i et magnetfelt, stiger et vist antal grader, og når materialet fjernes fra magnetfeltet, falder temperaturen tilbage til udgangspunktet igen. Potentielt kan man derfor opnå en højere effektivitet i et kølesystem baseret på den magnetokaloriske effekt.

Hvis det er tilfældet, kan man undre sig over, at alle køleskabe ikke er magnetiske. Det skyldes primært, at man ikke kan bruge den magnetokaloriske effekt direkte. Selv i ret kraftige magnetfelter (1-1,5 tesla) er den nemlig alt for lille, i størrelsesordenen 3-4 °C, til at den alene kan udnyttes til at køle et køleskab. Man bliver derfor nødt til at bruge den lille magnetokaloriske temperaturændring til at opbygge en meget større temperaturforskul mellem et køleskabs kolde og varme side. Det gør man ved at arrangere de magnetokaloriske materialer i en såkaldt regenerator, der på samme tid kan opretholde temperaturforskellen og transportere varmen fra den kolde til den varme side. Varmetransporten sker ved hjælp af en væske, typisk vand eller vand blandet med kølevæske (hvis man skal under 0 °C), der skubbes frem

Artiklen kommer fra tidsskriftet *Aktuel Naturvidenskab*: aktuelnaturvidenskab.dk

fremtid



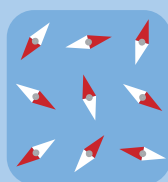
og tilbage i regeneratoren. Lokalt i regeneratoren skifter temperaturen under en kølecyklus kun de 3-4 °C som den magnetokaloriske effekt giver, mens temperaturforskellen fra den ene ende af regeneratoren til den anden er mange gange større. Selvom vandet ikke skifter fase undervejs i processen, vil der stadig optræde tab, når varmen skal overføres mellem regeneratoren og væsken. En stor del af udfordringen er derfor at designe regenerators, der er så effektive som muligt til at overføre varme samtidig med, at de også har en høj magnetokalorisk effekt.

Den afgørende Curie-temperatur

Den magnetokaloriske effekt skyldes et samspil mellem den magnetiske orden og molekylerens varmebevægelse i et magnetisk materiale. Dette samspil er særligt tæt i nærheden af den såkaldte Curie-temperatur, som er forskellig fra materiale til materiale. Når temperaturen er lavere end Curie-temperaturen, er materialet magnetisk, mens det er umagnetisk, når temperaturen er højere end Curie-temperaturen. Det er kun i temperaturområdet omkring Curie-temperaturen, at der er en magnetokalorisk effekt af betydning, og det gælder derfor om at finde materialer, der både har en høj effekt og en Curie-temperatur, der ligger i det rigtige område. Et meget brugt materiale er grundstoffet gadolinium, som har en Curie-temperatur på 20 °C.

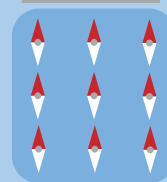
En stor del af den internationale forskningsindsats går på at finde nye magnetokaloriske materialer. Hele forskningsområdet blev da også for alvor sat i gang da V.K. Pecharsky og K.A. Gschneidner, Jr., fra det amerikanske Ames Laboratory i 1997

Småmagneterne er uordnede



T
Temperatur

Småmagneterne retter sig ind efter det ydre magnetfelt



T + ΔT
Temperaturstigning

Magnet der flyttes frem og tilbage

Den magnetokaloriske effekt

Et magnetisk materiale kan forsimplet betragtes som bestående af en samling af atomare småmagneter (små kompasnåle på tegningen). Magnetfeltet fra hver enkelt småmagnet stammer fra elektronernes bevægelse omkring atomkernen i kombination med det indre impulsmoment (spin) som hver elektron har.

Selv om et materiale består af disse småmagneter er det dog ikke sikkert, at det fremstår som magnetisk; det gør det kun, hvis vekselvirkningen mellem to nabomagneter er sådan, at de foretrækker at pege i samme retning. Jo højere temperaturen er, jo sværere bliver det for to nabomagneter at blive ved med at pege i samme retning, da de tilfældige molekylære varmebevægelser vil forstyrre ordenen. Når materialets temperatur overstiger dets såkaldte Curie-temperatur, vil varmebevægelserne være så kraftige, at de ødelægger den magnetiske orden.

Lige omkring Curie-temperaturen balancerer temperaturens tendens til uorden næsten småmagneternes ønske om at være ordnede. Det betyder, at man med et ydre magnetfelt kan påvirke den magnetiske orden kraftigt. Når man nærmer en tilpas kraftig magnet til materialet, vil alle småmagneterne rette sig ind efter det ydre magnetfelt. Det nedbringer graden af magnetisk uorden (eller for at være mere præcis: den magnetiske entropi falder) i materialet, men hvis materialet ikke udveksler varme med omgivelserne er dets samlede entropi bevaret. Derfor vil den øgede orden af småmagneterne blive kompenseret af flere tilfældige varmebevægelser af molekylerne, dvs. en øget temperatur.

Temperaturstigningen ΔT er den magnetokaloriske effekt. Hvis man fjerner magneten igen, bliver småmagneterne atter uordnede, og temperaturen falder tilbage til den oprindelige. Den magnetokaloriske effekt er derfor reversibel.

opdagede den såkaldte *giant magnetocaloric effect* i materialet $Gd_5Si_2Ge_2$ (gadolinium-silicium-germanium), hvor effekten er endnu større end i gadolinium. I dag er fokus i høj grad på at finde serier af materialer med forskellig Curie-temperatur, der kan sættes efter hinanden i en regenerator. Derved sikrer man, at hvert materiale virker i netop det temperaturområde, der er optimalt for det, og man kan dermed øge ydelsen.

Tværfaglige udfordringer

Det er imidlertid ikke nok at have et eller flere gode magnetokaloriske materialer. Man skal også kunne formgive dem, så man får en regenerator med lille modstand over for gennemstrømmende væske, men samtidig med højt overfladeareal så regeneratoren kan udveksle varmen med væsken. Desuden har man brug for en magnet med skarpt afgrænsede områder af henholdsvis højt magnetfelt og intet magnetfelt, og et systemdesign med en præcis timing af væskestrømning og magnetfelt.

Den krævede indsats er derfor i høj grad tværfaglig. På Institut for Energikonvertering og -lagring på DTU, hvor vi har arbejdet med magnetisk køling i snart 10 år, samarbejder fysikere, ingeniører, kemikere, laboranter og forskningsteknikere om bl.a. materialeudvikling, formgivning af materialer, design af magneter og systemer samt modellering både på mikroniveau og på systemniveau. Udfordringerne kan vise sig uventede steder. Det kan således virke som en trivielt ting at gå fra et godt materiale, udmålt og karakteriseret i form af en lille pulverprøve, til en regenerator bestående af fx kugler eller plader af det samme materiale. Det er imidlertid langt fra tilfældet – det kan være både dyrt

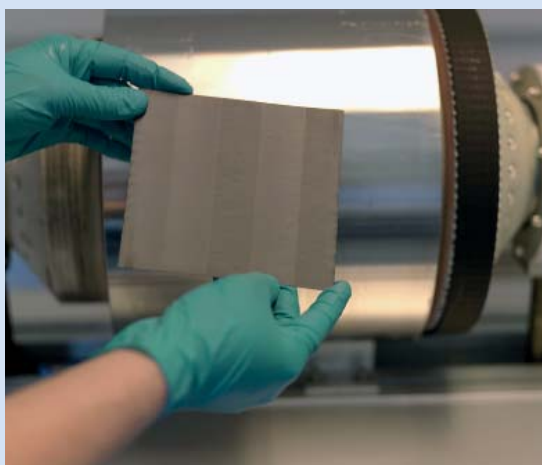
og vanskeligt at finde processer, der kan formgive de ofte ikke særligt mekanisk stærke materialer. På DTU Energikonvertering har vi udviklet en metode til billigt og hurtigt at fremstille plader af magnetokaloriske keramiske materialer, hvor man allerede i fremstillingsprocessen sammensætter dem af materialer med forskellige aktive temperaturområder og dermed skræddersyr pladerne til at gå direkte ind i en regenerator. Metoden er udviklet i samarbejde med kolleger inden for keramisk procesteknologi, et område som instituttet har mange års erfaring med i forbindelse med brændselsceller. Faktisk er de keramiske materialer, vi bruger, nært beslægtet med katodematerialerne i keramiske brændselsceller.

Prototype

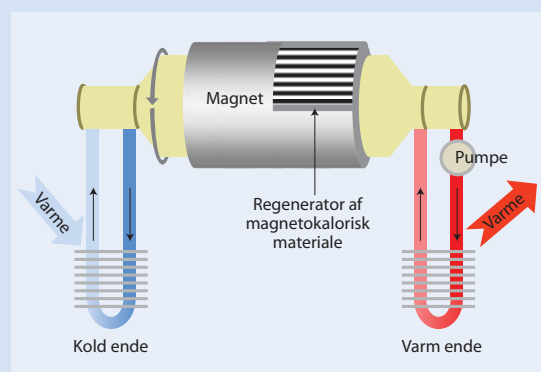
Vores tværfaglige tilgang til udviklingen er netop et af vores stærke fortrin i sammenligning med de mange internationale grupper, der også arbejder med den magnetokaloriske effekt og magnetisk køling. De fleste andre grupper fokuserer på et enkelt aspekt: enten på materialeudvikling, på modellering eller på systemopbygning. Vores hidtidige arbejde, støttet af Det Strategiske Forskningsråd gennem projektet MagCool, mandede i 2011 ud i konstruktionen af en laboratorieprototype, der demonstrerer teknologiens principper.

Prototypen består af en specialdesignet magnet, der har form som to koncentriske cylindre. Magneten danner fire områder med højt magnetfelt og fire områder med lavt magnetfelt i mellemrummet mellem de to cylindre. I dette mellemrum anbringes regeneratoren, som indeholder magnetokaloriske materialer i form af enten plader eller små kugler. Ved at rotere regeneratoren bliver materialerne

Prototype på en magnetisk køleenhed



Fotoet viser en plade af et keramisk magnetokalorisk materiale foran laboratorieprototypen. Pladen består af fem forskellige magnetokaloriske materialer med hver deres Curie-temperatur. På DTU Energikonvertering er der fremstillet et stort antal af sådanne plader, som skæres til og monteres som regenerators i prototypen som vist på principskitzen. Prototy-



pen består af en magnet med områder med højt og lavt magnetfelt, hvorigennem de magnetokaloriske materialer roteres. En væske pumpes rundt i systemet for at trække den resulterende opvarmning og nedkøling ud fra materialet. Det resulterer i en kold og en varm ende af systemet, hvorfra der kan optages og afgives varme.

skiftevis opvarmet og nedkølet. Samtidig strømmer der væske frem og tilbage langs regeneratoren for at transportere varmen fra den kolde ende af maskinen til den varme. Maskinens ydelse afhænger af driftsparametrene (rotationshastighed og væskestrømning). Selv om ydelsen nærmer sig noget praktisk anvendeligt, er der dog stadig tale om en laboratorieprototype. Fx skal prototypens hjælpekomponenter (motor og pumpe) optimeres væsentligt for at forbedre effektiviteten. Det er noget af det arbejde, vi er i gang med.

Konkurrencedygtig teknologi?

Når man arbejder med forskning, der har et anvendelsesmæssigt perspektiv, får man ofte spørgsmålet: Hvornår bliver teknologien kommerciel? Det er også et af de spørgsmål, der er sværest at besvare.

Nogle gange går det meget hurtigt med at omsætte et forskningsfelt til et produkt, mens det andre gange er et langt sejt træk. Andre gange igen (og måske de fleste) lykkes det aldrig. Desværre kan man ikke altid på forhånd forudsige, hvad der bliver en succes, og hvad der bliver en fiasko. Når det gælder magnetisk køling er vi oppe mod en uhyre moden og veludviklet teknologi i form af kompressoren, som ikke engang er særlig dyr. Dertil kommer, at flere af de materialer, der bruges til magnetisk køling indeholder de såkaldte sjældne jordarter, som der i øjeblikket er stor kommerciel og politisk fokus på, da Kina sidder på en meget stor del af verdensproduktionen og derfor i vid udstrækning kan bestemme priserne. De magneter man skal bruge, indeholder også en af de sjældne jordarter, neodym. Man kan derfor spørge, om magnetisk køling nogensinde vil blive konkurrencedygtig rent prismæssigt.

Vi og flere andre forskningsgrupper har udført omkostningsanalyser, der viser, at trods indholdet af sjældne jordarter vil teknologien på længere sigt godt kunne konkurrere med de eksisterende køleteknologier. Dertil kommer, at de to dyreste komponenter, regeneratoren og magneten, ikke slides og derfor let vil kunne genbruges efter køleskabet er udtjent. Én mulighed er at tænke i nye forretningsmodeller, hvor forbrugeren leaser sit køleskab og returnerer det efter endt brug til genanvendelse.

Fremtiden for magnetisk køling

Når det er sagt, er der dog nok heller ikke nogen tvivl om at husholdningskøleskabet ikke er den anvendelse hvor magnetisk køling først får sit gennembrud – markedet er for prispåvirket og den potentielle besparelse for forbrugeren ikke stor nok endnu. Derimod ser vi gode muligheder for anvendelser inden for forskellige niches, hvor fordelene ved magnetisk køling kommer til sin ret: store anlæg til fx supermarkeder eller kølecontainere, specialanvendelser som køling af servere i datacentre, små lydlose anlæg til hotelværelser og ikke mindst varmepumper til opvarmning.

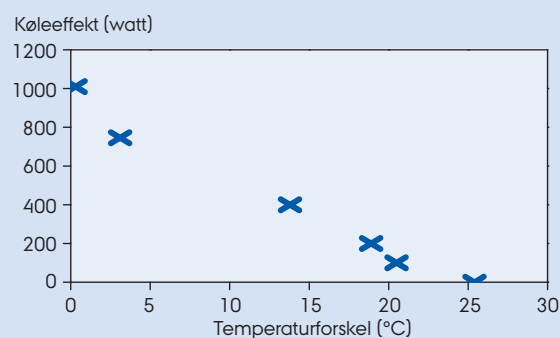
Vi har netop fået bevilget et stort projekt fra Det Strategiske Forskningsråds Programkomite for Energi og Miljø, hvor vi i samarbejde med danske og internationale forskningsinstitutioner og virksomheder skal tilvejebringe det forskningsmæssige grundlag for at bruge teknologien til varmepumper. Projektet vil munde ud i demonstrationen af en magnetisk varmepumpe i 2016. Vi tør derfor godt spå at magnetisk køling går en varm fremtid i møde. ■

Læs mere

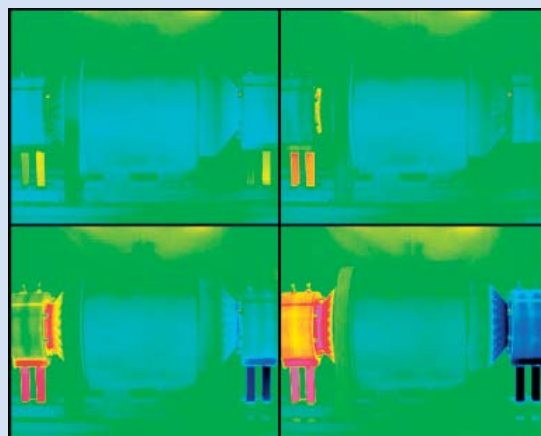
A. Smith, C.R.H. Bahl, R. Bjørk, K. Engelbrecht, K.K. Nielsen og N. Pryds: 'Materials challenges for high performance magnetocaloric refrigeration devices', *Adv. Energy Mater.* 2, 1288-1318 (2012)

K.A. Gschneidner, Jr., og V.K. Pecharsky: 'Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects', *Int. J. Refr.* 31, 945-961 (2008)

K. Engelbrecht, D. Eriksen, C.R.H. Bahl, R. Bjørk, J. Geyti, J.A. Lozano, K.K. Nielsen, F. Saxild, A. Smith og N. Pryds: 'Experimental results for a novel rotary active magnetic regenerator', *Int. J. Refrig.* 35, 1498-1505 (2012)



Resultater opnået med DTU Energikonverterings laboratorieprototype til magnetisk køling. I dette tilfælde har vi anvendt gadolinium som magnetokalorisk materiale. Den højeste temperaturforskel fås der, hvor der ikke produceres nogen køleeffekt, og tilsvarende fås den højeste køleeffekt der, hvor den kolde og varme ende har samme temperatur. Ingen af disse situationer er nyttige til faktiske anvendelser, hvor man ønsker både køleeffekt og temperaturforskel samtidig. Med en temperaturforskel på 21 °C kan prototypen levere 100 watt køleeffekt. Til sammenligning har et almindeligt køleskab en køleeffekt på omkring 25 watt.



Termografiske billeder af prototypen på DTU Energikonvertering, optaget med et infrarødt kamera. Man ser, hvordan der hurtigt opbygges en temperaturforskel mellem den varme ende (tv. på billederne) og den kolde ende (th.). Under sædvanlig drift er rørene isolerede for at undgå varmetab, men her er isoleringen fjernet af hensyn til optagelserne.