

*TNO-rapport*  
TNO-MEP – R 98/370

TNO Milieu, Energie  
en Procesinnovatie

Laan van Westenenk 501  
Postbus 342  
7300 AH Apeldoorn  
Telefoon 055 - 549 34 93  
Fax 055 - 541 98 37

## **Efficiënt regelen van koelsystemen**

State-of-the-art rapport

Datum  
oktober 1998

Auteur(s)  
Ing. H. Schiphouwer  
Ir. B.J.C. van der Wekken

Projectnummer  
26378

Novem projectnummer  
3383.30/87.61

Bestemd voor  
Novem Utrecht  
t.a.v. Ing. J. van de Velde  
Postbus 8242  
3503 RE Utrecht

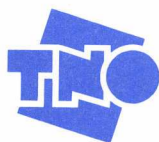
Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar  
gemaakt door middel van druk, foto-  
kopie, microfilm of op welke andere  
wijze dan ook zonder voorafgaande  
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
Algemene Voorwaarden voor onder-  
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel  
de betreffende terzake tussen de  
partijen gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het  
TNO-rapport aan direct belang-  
hebbenden is toegestaan.

© 1998 TNO

Het kwaliteitssysteem van TNO Milieu, Energie en  
Procesinnovatie voldoet aan ISO 9001.

TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie is een nationaal en  
internationaal erkend kennis- en contractresearch instituut  
voor bedrijfsleven en overheid op het gebied van duurzame  
ontwikkeling en milieu- en energiegerichte procesinnovatie.



Nederlandse Organisatie voor toegepast-  
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de Algemene  
Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, zoals  
gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank en de  
Kamer van Koophandel te 's-Gravenhage.

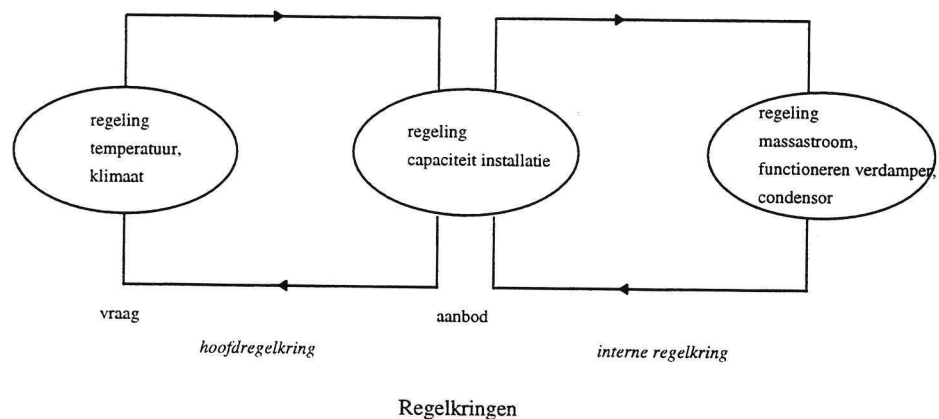
## Samenvatting

In de koeltechniek is er een duidelijk toenemende interesse waar te nemen in de toepassing van geavanceerde regelsystemen. Een overzicht waarin de van belang zijnde aspecten die een rol spelen bij de keuze van een bepaald regelsysteem bij specifieke koel- en vriessystemen is niet beschikbaar. Novem heeft TNO-MEP, Afdeling Koudetechniek en Warmtepompen een opdracht gegeven voor het samenstellen van een state-of-the-art rapport omtrent het thema 'Efficiënt regelen van koelsystemen'. Op basis van dit rapport zal vervolgens een aantrekkelijk leesbare brochure worden opgesteld, bestemd voor adviseurs, installateurs en eindgebruikers van (industriële) koeltechniek.

De toegepaste regelsystemen bij industriële compressie-koelmachines zijn onderzocht. De toegepaste regelstrategieën met betrekking tot optimalisatie van het inkoel-, invries- of bewaarproces, beschouwd vanuit het product, zijn niet onderzocht. Een aantal praktijkcases waarin sommige van de beschouwde regelstrategieën zijn toegepast, wordt nader toegelicht.

### Regelsystemen

Bij een koelsysteem kunnen twee regelkringen worden onderscheiden, de hoofdregelkring of externe regelkring, en de interne regelkring.



De afstemming van de vraag van de koudegebruiker, vaak de temperatuur, en het aanbod van de koelinstallatie, de koelcapaciteit, vormt de hoofdregelkring. De onderlinge afstemming van de diverse installatieonderdelen valt binnen de interne regelkring. De regeling van de koudemiddelmassastroom is een belangrijke regeling binnen de interne regelkring.

Binnen deze regelkringen gelden de volgende criteria ten aanzien van energie-efficiëntie:

- zorgen voor een zo klein mogelijk drukverschil over de compressor door:

- een zo hoog mogelijke zuigdruk,
- een zo laag mogelijke condensatiedruk;
- zorgen voor een minimalisatie van compressorverliezen.

### *Hoofregelkring*

De hoofregelkring wordt gekenmerkt door het samenspel tussen één of meerdere koudegebruikers en de koelinstallatie. De koelinstallatie kan meerdere compressoren omvatten.

Binnen de hoofregelkring kunnen globaal drie basis capaciteitsregelingen worden onderscheiden:

- aan-/uit regelen,
- regelen op basis van de zuigdruk;
- regelen op basis van compressor vollastbedrijf.

In de praktijk zullen vaak combinaties van deze regelingen voorkomen.

De onderstaande tabel geeft de toepassingsgebieden van de drie capaciteitsregelingen aan.

Regeling	Toepassing	Opmerking
Aan-/uitregeling	Continue inkoel-/invriesprocessen (ijs, aardappelproducten, vlees etc) Processen met water- of ijsbuffer.	De regeling is zeer eenvoudig.
Regelen op zuigdruk (deellastregeling, vergrote zuigdrukdifferentie)	Temperatuur- en/of uitdrogingsgevoelige producten: fruit, landbouwproducten. Systemen met slechts enkele koudegebruikers	Capaciteitsregeling door continue toerenregeling is een aantrekkelijke optie voor deellastregeling.
Regelen op compressor vollastbedrijf (mogen/moeten)	Koel- en vrieshuizen, algemeen toepasbaar bij installaties met meerdere (gelijksoortige) koudegebruikers.	Hoe groter de toelaatbare temperatuurbreedte des te beter toepasbaar. Ook toepasbaar bij kleinere bandbreedtes, alleen zal deellastbedrijf meer optreden.

Bij aan/uitregeling wordt de compressor (koelinstallatie) op basis van de temperatuur van de koudegebruiker in- en uitgeschakeld. De zuigdruk (verdampings-temperatuur) wordt niet geregeld. Dit is een zeer simpele, maar in het algemeen geen energiezuinige regeling.

Bij de regeling op basis van zuigdruk wordt de zuigdruk op de gewenste waarde gehouden door variatie van de capaciteit van de compressor(en). Continue toeren-variëatie van de compressor door frequentieomvorming is de meest energie-efficiënte methode van capaciteitsregeling per compressor. De kostprijs van de frequentieregeling is de laatste jaren sterk gedaald en interessant geworden voor toepassing in de koeltechniek.

Vergroting van de zuigdrukdifferentie (verschil tussen in- en uitschakelpunt van de zuigdruk) en tevens het alleen toestaan dat compressoren op vollast draaien, kun-

nen tot een energiezuiniger koelinstallatie leiden. De compressoren zullen langere perioden op vollast draaien en weinig schakelen. De installatie werkt op deze manier energiezuiniger dan een installatie met veel schakelende en op deellast (op conventionele wijze geregeld) draaiende compressoren.

Bij deze basisregeling bestaat, indien er sprake is van meerdere koudegebruikers, geen coördinatie tussen de koudegebruikers. De benodigde capaciteit wordt volledig gedecteerd door de momentane koudevraag van de gebruikers.

Bij de regeling op basis van compressor vollastbedrijf vindt de capaciteitsregeling plaats door meer of minder koudegebruikers in te schakelen. Bij deze mogelijkheid/moeten regeling worden één of meerdere compressoren ingeschakeld op vollast. De vollastsituatie op een bepaalde conditie wordt zolang mogelijk gehandhaafd door het inschakelen van koudegebruikers die koeling echt nodig hebben (**moeten**) en door koudegebruikers die nog koeling kunnen gebruiken (**mogen**). Deellastverliezen blijven op deze manier tot het minimum beperkt, hetgeen energiebesparend werkt. Bovendien werken de compressoren niet onnodig op een lage zuigdruk (verdampingstemperatuur), waardoor energiebesparing wordt bereikt.

#### *Interne regelkring*

De regeling van de koudemiddelmassastroom is één van de belangrijkste regelingen binnen de interne regelkring.

De wijze van regeling van de koudemiddelmassastroom door het smoorventiel is afhankelijk van het toepassen van natte of droge verdamping.

Bij natte verdampingssystemen (circulatie- of pompsystemen) is de koudemiddelstroom door het smoororgaan niet gelijk aan de koudemiddelstroom naar de verdamper (afscheider met meerdere verdampers). De smoorventielregeling bij natte verdamping is veelal gebaseerd op regeling van het vloeistofniveau in de afscheider. De momenteel verkrijgbare systemen functioneren goed en zijn betrouwbaar. In het algemeen kan bij natte verdamping met lagere condensatietemperaturen worden gewerkt dan met droge verdamping, hetgeen een gunstig effect heeft op het energiegebruik van de installatie.

Bij droge verdampingssystemen (directe expansie) is de koudemiddelstroom door het smoororgaan gelijk aan de koudemiddelstroom naar de verdamper. De expansieregeling van droge verdampingssystemen (directe expansie) is duidelijk in ontwikkeling. De ontwikkeling van de zogenaamde verbeterde expansieregelingen is met name gericht op een optimale vloeistofvulling van de verdamper. Deze regelingen maken het tevens mogelijk om ook bij lagere condensatietemperaturen dan toepasbaar bij een thermostatisch expansieventiel de verdamper optimaal te benutten. Hierdoor kan gedurende een groot gedeelte van het jaar compressie bij een kleiner drukverschil plaatsvinden, waardoor de koelinstallatie energiezuiniger wordt bedreven.

Verbeterde expansieregelingen hebben betrekking op apparaten in combinatie met een conventioneel thermostatisch expansieventiel of op een elektronisch ventiel.



Een elektronisch expansieventiel is aanzienlijk duurder dan een thermostatisch expansieventiel. De terugverdientijd van de extra kosten ligt in de orde van 2 à 3 jaar.

### *Praktijkcases*

Een aantal van de bovengenoemde regelingen zijn in de praktijk nader beproefd. Drie van de onderzochte cases hebben betrekking op capaciteitsregelingen, vallend binnen de hoofdregelkring. De andere twee cases hebben betrekking op een verbeterde expansieregeling bij droge verdampingssystemen, vallend binnen de interne regelkring.

### *Hoofdregelkring*

1. Toepassing van toerengeregelde compressoren bij het inkoelen en bewaren van fruit leverde ten opzichte van conventionele capaciteitsregeling door middel van cilinderafschakeling door zuigklepliching, een energiebesparing van 22% op. In dit specifieke geval was de terugverdientijd minder dan één jaar.
2. Toepassing van een vergrote zuigdrukdifferentie bij een capaciteitsregeling op zuigdruk en tevens het met de koudelevering mee laten schakelen van de verdamperventilatoren (in plaats van continu aan) leverde bij een koel- en vrieshuis een energiebesparing van 35 % op. De terugverdientijd is minder dan 4 maanden.
3. De toepassing van een mogen/moeten regeling op basis van compressor vol-lastbedrijf leverde bij een vrieshuis een energiebesparing van 30 à 35% op. Gegevens over de terugverdientijd ontbreken.

### *Interne regelkring*

4. Toepassing van elektronische expansieventielen in een supermarkt leverde een jaargemiddelde reductie van 12% op. De terugverdientijd van de meerinvestering bedroeg 3,7 jaar.
5. Toepassing van een drukverhogingsunit, een verbeterde expansieregeling op basis van een thermostatisch expansieventiel, in de koelinstallatie van een fruitkoelhuis, leverde een energiebesparing van 33% op. De terugverdientijd bedroeg 6,5 jaar, bij verwachte toekomstige marktprijs zou de terugverdientijd 5,3 jaar bedragen.

## Inhoudsopgave

Samenvatting .....	2
1. Inleiding .....	8
2. De compressiekoelmachine en de te regelen grootheden.....	9
2.1    Werkingsprincipe .....	9
2.2    Wat moet er worden geregeld .....	10
3. Hoofdregelkring.....	12
3.1    Capaciteitsregeling van koelcompressoren .....	12
3.1.1    Zuigercompressoren .....	12
3.1.2    Schroefcompressoren.....	14
3.2    Regeling van de product- of ruimtetemperatuur, samenspel koudegebruiker(s) en koelinstallatie .....	15
3.2.1    Aan-/uitregeling .....	15
3.2.2    Regelen op basis van de zuigdruk .....	16
3.2.3    Regelen op basis van compressor vollastbedrijf.....	18
4. Interne regelkring van de koelkringloop .....	20
4.1    Het droge verdampings- of directe expansiesysteem (DX) .....	20
4.1.1    Thermostatisch expansieventiel (TEV).....	20
4.1.2    Verbeterde expansieregeling op basis van een thermostatisch expansieventiel .....	21
4.1.3    Elektronisch expansieventiel (EEV) .....	23
4.2    Het natte verdampingssysteem of circulatiesysteem.....	24
5. Globaal overzicht van toepassingsgebieden voor de diverse regelsystemen .....	25
6. Praktijkcases .....	27
6.1    Toepassing van elektronische expansieventielen in een supermarkt met een koel- en een vriesinstallatie .....	27
6.2    Toepassing van toerengeregelde compressoren bij het inkoelen en bewaren van fruit .....	27
6.3    Toepassing van de mogen/moeten-regeling op basis van compressor vollastbedrijf bij vrieshuizen .....	28
6.4    Toepassing van een drukverhogingsunit in een koelinstallatie.....	29
6.5    Toepassing van een regeling op basis van compressor vollastbedrijf door middel van het vergroten van de zuigdrukdifferentie en het schakelen van de verdamperventilatoren bij een koel- en vrieshuis.....	30

7.	Conclusies .....	32
8.	Referenties .....	35
9.	Verantwoording .....	36

Figuren 1 t/m 11

## 1. Inleiding

In de koeltechniek is er een duidelijk toenemende interesse waar te nemen in toepassing van geavanceerde regelsystemen. Relatief nieuwe technieken zijn onder andere de toepassing van een continue toerenregeling bij koelcompressoren, de toepassing van de zogenaamde "mogen/moeten" regeling om deellast bedrijf van compressoren te minimaliseren en verbeterde expansieregelingen. Een overzicht van de van belang zijnde aspecten die een rol spelen bij de keuze van een bepaald regelsysteem bij specifieke koel- en vriessystemen is niet beschikbaar. Novem heeft TNO-MEP, Afdeling Koudetechniek en Warmtepompen opdracht gegeven voor het samenstellen van een state-of-the-art rapport, als basis voor de tekst van een brochure omtrent het thema 'Efficiënt regelen van koelsystemen'.

Dit rapport geeft de state-of-the-art weer van het regelen van koelsystemen en de daarmee te bereiken energiebesparingen. Op basis van dit rapport zal in samenwerking met het journalistieke bureau Houtsma & Van der Schot een aantrekkelijk leesbare brochure worden opgesteld. De brochure is bestemd voor adviseurs, installateurs en eindgebruikers van (industriële) koeltechniek. Het niveau van de doelgroep is HBO/MBO<sup>+</sup> niveau.

Het project beperkt zich tot industriële koelsystemen (koel/vrieshuizen, fruitbewaring, slachterijen, bierbrouwerijen, aardappelverwerkende industrie, eventueel grote supermarktinstallaties etc.). Tot op heden worden zo goed als uitsluitend compressiekoelmachines toegepast bij industriële koel- en vriessystemen. Dit rapport behandelt alleen de toegepaste regelsystemen bij compressiekoelmachines. De toegepaste regelstrategieën met betrekking tot optimalisatie van het inkoel-, invries- of bewaarproces van het product zelf worden in dit rapport niet behandeld.

Voor een gebruiker is een kosten-efficiënte regeling van groter belang dan alleen een energie-efficiënte regeling. Vaak kan met een juiste regeling, bijvoorbeeld peak-shaving worden toegepast zonder te veel inbreuk te doen op de kwaliteit van de koeling. Hierbij kan het voorkomen dat de regeling minder energie-efficiënt is maar wel veel kosten-efficiënter.

Het rapport richt zich echter met name op energiebesparing.

Het rapport is tot stand gekomen door interviews met adviseurs en installateurs uit de koeltechnische praktijk (Koeltechnisch Adviesburo Verhoef, RBK groep, ITHO, Hollander B.V., Sabroe Koudetechniek (voorheen ABB Stal Koudetechniek), Van Kempen Koudetechniek en Grenco), door een beperkte literatuurrecherche en literatuurstudie, en op basis van de aanwezige TNO expertise.

## 2. De compressiekoelmachine en de te regelen grootheden

### 2.1 Werkingsprincipe

Voordat ingegaan wordt op de regeling zal eerst in zijn meest eenvoudige vorm het compressiekoelsysteem worden behandeld. Op basis van deze principe beschrijving zal vervolgens aangegeven worden wat er voor een goede werking geregeld moet worden aan een compressiekoelsysteem. In de volgende hoofdstukken worden de regelingen nader uitgewerkt.

De compressiekoelmachine bestaat in zijn eenvoudigste vorm in hoofdzaak uit 4 componenten, zoals weergegeven in figuur 1:

1. verdamper
2. compressor
3. condensor
4. smoorventiel

Het compressiekoelproces verloopt als volgt. In de verdamper verdampt koudemiddel bij een temperatuur  $t_v$  (verdampingstemperatuur) die iets lager is dan de temperatuur  $t_i$  van de koudegebruiker, waaraan de warmte  $Q_v$  wordt onttrokken. De gevormde damp wordt in de compressor in druk en temperatuur verhoogd, waarna de damp in de condensor komt. Aan de compressor wordt het aandrijfvermogen  $P$  toegevoerd. In de condensor condenseert het koudemiddel bij de temperatuur  $t_c$  (condensatietemperatuur) die hoger is dan de temperatuur  $t_h$  van het medium waaraan de warmte  $Q_c$  wordt afgegeven. In het smoorventiel wordt het vloeibare koudemiddel uit de condensor in druk verlaagd voordat het de verdamper binnenkomt. Hiermee is het kringloopproces gesloten.

De warmtestroom  $Q_v$ , het koudevermogen, geeft de prestatie van de koelmachine aan. Om de kringloop te laten werken moet de arbeid  $W$  worden toegevoerd. De koudefactor COP (Coefficient of Performance) is een maat voor de efficiëntie van de kringloop en is gedefinieerd als:

$$COP = Q_v/P = \eta_c * T_v/(T_c - T_v)$$

Het quotiënt  $T_v/(T_c - T_v)$  geeft de hoogst bereikbare koudefactor weer van een volledig ideaal verlopend (Carnot) proces.  $T_v$  en  $T_c$  zijn de absolute verdampings- respectievelijk condensatietemperatuur.  $\eta_c$  wordt het Carnotrendement genoemd en geeft de verhouding weer tussen het theoretisch ideaal verlopende proces en het in de praktijk werkelijk gerealiseerde proces. De waarde van  $\eta_c$  hangt af van de kwaliteit van de koelmachine en van de grootte van het koudevermogen. Bij koudevermogens van 100 kW en hoger en een goed ontwerp is een Carnotrendement van 0,6 à 0,65 realiseerbaar. Bij kleinere koudevermogens en slecht onderhouden of

slecht geregelde installaties kan het Carnotrendement echter afnemen tot beneden de 0,2.

De COSP (Coefficient of System Performance) houdt tevens rekening met de benodigde hulpenergie. Het in de formule voor de COP genoemde compressoraandrijfvermogen  $P$ , wordt voor de COSP vervangen door het totaal opgenomen vermogen van de koelinstallatie.

Uit bovengenoemde beschouwing blijkt dat hoe kleiner het verschil tussen de condensatietemperatuur  $T_c$  en de verdampingstemperatuur  $T_v$  gekozen kan worden des te hoger de COP van de installatie is. De hierna behandelde regelingen zijn er veelal op gericht om de verdampingstemperatuur zo hoog mogelijk en de condensatietemperatuur zo laag mogelijk te houden.

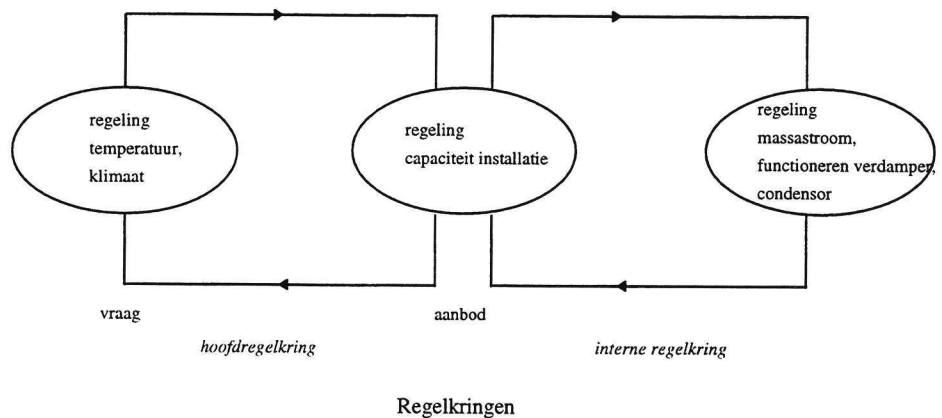
## 2.2 Wat moet er worden geregeld

Globaal kunnen bij een koelsysteem twee regelkringen worden onderscheiden, de hoofdregelkring en de interne regelkring.

De functie van een koelsysteem is het inkoelen, invriezen of bewaren van producten onder optimale omstandigheden om een zo goed mogelijk kwaliteitsbehoud te realiseren. Dat betekent dat de temperatuur van de koudegebruiker  $t_i$  en soms ook de vochtigheid binnen vrij nauwe grenzen moet worden geregeld.

Om de gewenste product-of ruimtetemperatuur  $t_i$  te bereiken of in stand te houden werkt de verdamper bij een verdampingstemperatuur  $t_v$  die lager is dan de temperatuur  $t_i$  van de koudegebruiker. Omdat in de verdamper sprake is van een kokend koudemiddel, correspondeert met deze verdampingstemperatuur een bepaalde verdampingsdruk. De verdampingsdruk of compressor zuigdruk is afhankelijk van de warmtebelasting  $Q_v$  op de verdamper en het door de compressor verplaatste gasvolume. De verdampingsdruk kan worden geregeld door aanpassing van de compressorcapaciteit, door vergroting of verkleining van het (slag)volumedebiet. Ook de relatieve vochtigheid in een koelruimte kan worden geregeld op basis van de verdampingstemperatuur. Bij een relatief groot temperatuurverschil tussen  $t_i$  en  $t_v$  zal de lucht op de verdamper meer ontvochtigd worden, resulterend in een drogere cellucht, dan bij een klein temperatuurverschil tussen  $t_i$  en  $t_v$ .

Deze afstemming van de vraag van de koudegebruiker en de levering door de koelinstallatie vormt de hoofdregelkring van het koelsysteem.



De interne regelkring bestaat uit de onderlinge afstemming van de diverse installatiecomponenten op elkaar (de koelkringloop).

De functie van de interne regelkring is het handhaven van het drukverschil tussen condensor en verdamper en de regeling van de koudemiddelmassastroom door het smoororgaan. De regeling van de koudemiddeltoevoer naar de verdamper, de regeling voor het functioneren van de condensor en de regeling voor het functioneren van de verdamper maken onderdeel uit van de interne regelkring.

De massastroom-, zuigdruk- en condensordrukregeling zijn de belangrijkste regelkringen binnen de interne regelkring.

In de volgende hoofdstukken worden de belangrijkste regelmechanismen in detail beschreven.



### 3. Hoofdregelkring

Binnen de hoofdregelkring vormen de regeling van de temperatuur van de koudegebruiker (vraagzijde), de capaciteitsregeling van de koelcompressor(en) (aanbodzijde) en de afstemming tussen vraag en aanbod, de belangrijkste regelingen.

In de volgende paragrafen worden de capaciteitsregeling per compressor en het samenspel tussen één of meerdere koudegebruikers en meerdere compressoren beschreven.

#### 3.1 Capaciteitsregeling van koelcompressoren

De capaciteitsregeling van een koelcompressor is meestal gebaseerd op de verdampings- of zuigdruk van de compressor. Deze verdampingsdruk of compressor zuigdruk is afhankelijk van de warmtebelasting (koudevraag) op de verdamper en van het door de compressor verplaatste gasvolume. De verdampingsdruk kan op de gewenste waarde worden geregeld door aanpassing van de compressorcapaciteit, door vergroting of verkleining van het (slag)volumedebiet.

In industriële compressiekoelinstallaties worden zowel zuiger- als schroefcompressoren toegepast. Voor de kleinere vermogens worden met name zuigercompressoren toegepast. Voor de grotere vermogens zowel zuiger- als schroefcompressoren. Van beide typen compressoren worden de verschillende methoden van capaciteitsregeling behandeld.

##### 3.1.1 Zuigercompressoren

De meest gebruikelijke conventionele methode om de capaciteit van zuigerkoelcompressoren aan te passen aan de koudevraag is gebaseerd op het afschakelen van het aantal werkzame cilinders. In de praktijk wordt dit gerealiseerd door zuigkleplichting, door een interne by-pass tussen de zuig- en de persruimte of door afsluiting van de zuiggastoevoer. Deze drie manieren van capaciteitsregeling hebben een verlaging van de koudefactor (COP) van de installatie tot gevolg en zijn dus ongunstig voor het energiegebruik. Het principe van een zuigercompressor is weergegeven in figuur 2. Het opgenomen elektrisch vermogen  $P_e$  van een koelcompressor is opgebouwd uit de volgende posten:

$$P_e = P_{th} + P_{kl} + P_w$$

Hierin is  $P_{th}$  het benodigd vermogen om de aangezogen koudemiddeldamp te comprimeren,  $P_{kl}$  het klepverliesvermogen en  $P_w$  het wrijvingsverliesvermogen in de compressor.

Als bij een zuigerkoelcompressor het aantal werkzame cilinders wordt verminderd, zal van de uitgeschakelde cilinder in feite alleen het compressievermogen  $P_{th}$  verdwijnen. Het wrijvingsvermogen  $P_w$  van die cilinder blijft namelijk in volle omvang aanwezig omdat de zuigers heen en weer blijven bewegen. Het "normale" klepverliesvermogen  $P_{kl}$  wordt bijvoorbeeld bij zuigkleplichting vervangen door het pompvermogen dat nodig is om het zuiggas via de vol geopende zuigkleppen aan te zuigen en uit te drijven. Daarom zal bij afname van het werkzame slagvolumedebiet het effectief opgenomen vermogen  $P_e$  in minder sterke mate afnemen.

In figuur 3 wordt, ter illustratie, voor een bestaande industriële koelcompressor [1,2] het opgenomen vermogen weergegeven als functie van het slagvolumedebiet. Het slagvolumedebiet wordt geregeld door cilinderafschakeling (zuigkleplichting). De resultaten zijn gebaseerd op metingen. Voor het koudemiddel R22 neemt bij afname van het slagvolume van 50% het opgenomen vermogen met 40% af. Als we de afname van het koelvermogen gelijkstellen aan de afname van het slagvolumedebiet (constant volumetrisch rendement) dan bedraagt de afname van de koudefactor 17%, bij een verdampingstemperatuur van ( $t_v = t_o$ )  $-10^\circ\text{C}$  en een condensatietemperatuur ( $t_c$ ) van  $25^\circ\text{C}$ . Voor het koudemiddel  $\text{NH}_3$  neemt bij afname van het slagvolume van 50% het opgenomen vermogen met 45% af. De afname van de koudefactor bedraagt 9%, bij een verdampingstemperatuur van ( $t_o$ )  $-10^\circ\text{C}$  en een condensatietemperatuur ( $t_c$ ) van  $25^\circ\text{C}$ .

Een mogelijkheid van capaciteitsregeling die uit energetisch oogpunt de voorkeur verdient is verlaging van het toerental. Dit kan gerealiseerd worden door continue toerenregeling met een frequentieregelaar of door een poolomschakelbare elektromotor. De frequentieregelaar voor continue toerentalvariatie van de compressor met elektromotor aandrijving werd vanwege de hoge extra meerinvestering nauwelijks toegepast. Doordat de kostprijs van de frequentieregeling ten opzichte van enkele jaren geleden meer dan gehalveerd is staat de toepassing van continue toerentalvariatie momenteel weer volop in de belangstelling. Capaciteitsregeling door toerentalverlaging met een poolomschakelbare elektromotor is een 2-standen regeling en derhalve beperkter dan een continue toerenregeling met een frequentieregelaar. Toerenregeling door middel van de, met name enkele jaren geleden, aanmerkelijk goedkopere poolomschakelbare elektromotor wordt op beperkte schaal toegepast.

Het bij zuigercompressoren toepassen van capaciteitsregeling door toerentalreductie heeft als groot voordeel dat hierbij de koelcapaciteit nagenoeg evenredig met het toerental daalt (via het slagvolumedebiet, bij constant volumetrisch rendement), terwijl het opgenomen vermogen  $P_e$  sterker dan evenredig afneemt. Het klepverliesvermogen verandert met de derde macht van het toerental, zodat  $P_e$  meer dan evenredig met het toerental afneemt en het compressorrendement bij deellastbedrijf groter wordt.

De toename van de koudefactor bij toerentalverlaging bij gelijkblijvende verdampings- en condensatietemperatuur is ter illustratie voor een kleine industriële compressor [1] weergegeven in figuur 4. Voor R22 bedraagt de verhoging van de koudefactor circa 8% wanneer het toerental gehalveerd wordt van 1500 omw/min (50Hz) naar 750 omw/min (25Hz) bij een verdampingstemperatuur van  $-10^{\circ}\text{C}$  en een condensatietemperatuur van  $25^{\circ}\text{C}$ .

Ten opzichte van normaal vollastbedrijf bij conventionele zuigercompressoren zonder cilinderafsckakeling (1500 omw/min) nemen de wrijvingsverliezen in de toerengeregelde compressor meer dan evenredig toe wanneer het toerental boven nominaal wordt ingesteld (60 à 65 Hz), resulterend in een lagere koudefactor.

Nevenvoordelen van de toepassing van frequentieregeling op compressoren zijn:

- Het toerental is gedurende het merendeel van de bedrijfstijd lager dan de ontwerpwaarde, zodat gerekend kan worden met een langere levensduur en gemiddeld genomen een lager geluidsniveau.
- Het opgesteld compressorvermogen kan eventueel kleiner gekozen worden omdat het toerental boven nominaal ingesteld kan worden. De meeste compressoren kunnen in ieder geval op 60 Hz draaien. De koudefactor van de installatie neemt echter wel af, wat kan leiden tot een hoger energiegebruik.
- Door de relatief langzame aanloop en het continue aanpassen aan de momentane koudevraag zijn de aanloop (piek) vermogens gering. Softstarters, apparaten om de aanlooploopstroom van compressoren te verminderen, zijn bijvoorbeeld niet meer nodig zodat de meerinvestering voor de toerenregeling wat wordt gecompenseerd.
- Een goede beheersing van de koelruimtetemperatuur en eventueel de mate van productuitdroging, kan resulteren in een verbeterde productkwaliteit.

### 3.1.2 Schroefcompressoren

De schroefcompressor vindt in toenemende mate toepassing in de koeltechniek. In figuur 5 is schematisch een uitvoeringsvorm weergegeven. In het compressorhuis bevinden zich twee in elkaar grijpende rotoren. De in- en uitlaatopening bevinden zich aan weerszijden van het rotorhuis.

De groeven worden, als deze de inlaatopening passeren, steeds verder met damp gevuld. Daarna grijpen de beide rotoren in elkaar, zodat de damp in de ruimte tussen beide rotoren is opgesloten. Deze ruimte verkleint zich tijdens de rotatie, waardoor de compressie plaatsvindt. Bij een bepaalde rotorpositie komt de damp in verbinding met de uitlaatopening, waardoor de damp wordt uitgedreven. De schroefcompressor bezit een ingebouwde volume verhouding. Dit betekent dat de interne einddruk voor een gegeven koudemiddel uitsluitend afhankelijk is van de begin(zuig)druk en in het algemeen afwijkt van de heersende condensatiedruk. De

vervolgens optredende verhoging of verlaging van de persdruk gaat gepaard met energieverlies.

De conventionele methode om de capaciteit van schroefcompressoren aan te passen aan de koudevraag is gebaseerd op het verkleinen van de effectieve rotorlengte door middel van een regelschuif, waardoor de eigenlijke compressie later begint bij een kleiner groefvolume [7]. Dit is weergegeven in figuur 6. Het gevolg is dat bij een constant toerental het volume debiet afneemt, zodat bij gelijkblijvende verdampings- en condensatiecondities het aangezogen volume debiet en dus ook de koelcapaciteit kleiner wordt. Op deze wijze kan de capaciteit van 100% (regelschuif geheel naar links) traploos worden teruggeregeld tot circa 10% (regelschuif in uiterst rechtse positie).

Deze wijze van capaciteitsregeling heeft een aanzienlijke verlaging van de koudefactor (COP) van de installatie tot gevolg tijdens deellastbedrijf. Ter illustratie is in figuur 7 voor een bestaande industriële koelcompressor het opgenomen vermogen weergegeven als functie van de koelcapaciteit. Bij een afname van de koelcapaciteit van 50% neemt het opgenomen vermogen met slechts 30% af en bedraagt de afname van de koudefactor 29%.

In figuur 7 is tevens het opgenomen vermogen als functie van de koelcapaciteit weergegeven voor dezelfde schroefcompressor, waarbij de capaciteit geregeld wordt op basis van continue toerenvariatie door frequentieregeling. Het opgenomen vermogen neemt in dezelfde mate af als de koelcapaciteit, waardoor de koudefactor (COP) ook tijdens deellastbedrijf niet afneemt.

### **3.2 Regeling van de product- of ruimtetemperatuur, samenspel koudegebruiker(s) en koelinstallatie**

De regeling van de temperatuur van de koudegebruiker binnen een bepaalde bandbreedte is onderdeel van de hoofdregelkring tussen koudegebruiker en koelinstallatie. De relatieve vochtigheid wordt bij industriële koeltoepassingen meestal niet geregeld. De relatieve vochtigheid in de koel- of vriesruimte wordt met name bepaald door het reeds tijdens de ontwerpfase gekozen verschil tussen ruimte- en verdampingstemperatuur.

Bij de temperatuurregeling van een koudegebruiker moet het geïntegreerde systeem van koudegebruiker(s) en koelinstallatie worden beschouwd. De verschillende methoden waarop de regeling plaatsvindt tussen de koudegebruiker(s) en de koelinstallatie worden behandeld. Om een goed inzicht te geven in de verschillende uitgangspunten van de toegepaste regelingen worden de drie basis methoden besproken: aan-/uitregeling, regelen op basis van de zuigdruk en regelen op basis van compressor vollastbedrijf. In de praktijk is de regeling veelal gebaseerd op een combinatie van deze basisregelingen.

### 3.2.1 Aan-/uitregeling

Bij aan-/uitregeling is elke koudegebruiker veelal uitgerust met een eigen koelmachine. Het criterium bij deze regeling is de temperatuur van de koudegebruiker. Indien deze temperatuur boven de ingestelde bandbreedte komt wordt door middel van een thermostaat de compressor gestart. Indien de temperatuur beneden de ingestelde bandbreedte komt wordt de compressor weer gestopt.

De verdampingsdruk wordt niet geregeld en is afhankelijk van de warmtebelasting op de verdamper en van het door de compressor verplaatste, niet regelbare, gasvolume.

Het voordeel van deze regeling is de eenvoudige constructie en de eenvoudige regeling. Nadelen zijn de zeer grove regeling en de grote schakelfrequentie, die aanleiding geeft tot sterke stroomstoten en extra slijtage veroorzaakt [7]. In vergelijking met meer geavanceerde regelsystemen is de verdampingstemperatuur veelal lager, wat resulteert in een hoger energiegebruik.

### 3.2.2 Regelen op basis van de zuigdruk

De regeling wordt toegepast bij systemen bestaande uit meerdere koudegebruikers en/of capaciteitsgeregelde of parallel geschakelde compressoren. Indien de temperatuur van een koudegebruiker boven de ingestelde bandbreedte komt wordt door middel van de thermostaat de koudemiddeltoevoerklep naar de verdamper van de desbetreffende koudegebruiker geopend. De zuigdruk in het systeem wordt gemeten met een drukopnemer en binnen de ingestelde bandbreedte geregeld door het bij- of afschakelen van compressorcapaciteit. In zijn meest eenvoudige vorm is er geen coördinatie tussen de koudegebruikers. Het benodigde compressorvermogen wordt volledig opgelegd door de momentane koudevraag van de gebruikers.

In hoofdstuk 3.1 zijn de verschillende methoden van capaciteitsregeling van koelcompressoren behandeld. De verschillende regelingen worden behandeld in relatie tot de regeling op basis van de zuigdruk.

Capaciteitsregeling door cilinder bij- of afschakeling van zuigercompressoren of door bij- af afschakeling van parallelle compressoren is een niet traploze regeling en kan zich over het algemeen niet exact aanpassen aan de koudevraag. Hierdoor werkt het systeem altijd gedurende een bepaalde tijd op een te lage verdampings-temperatuur en druk, wat resulteert in een hoger energiegebruik. In hoofdstuk 3.2 is genoemd dat vermindering van het aantal werkzame cilinders eveneens leidt tot een afname van de koudefactor van de installatie. Verder kan de expansieregeling verstoord raken door het stapsgewijs vergroten of verkleinen van de koelcapaciteit. De druk in de vloeistofleiding naar het expansieorgaan daalt stapsgewijs door afschakeling van een cilinder of een parallelle compressor. Door deze plotselinge

drukvaling kan de vloeistof gaan koken (flashgas) en de werking van het expansieorgaan negatief beïnvloeden. Om een goede werking van het expansieventiel onder alle condities te garanderen wordt de condensatietemperatuur, door middel van condensordrukregeling, op een relatief hoge waarde geregeld. Het niet te veel laten dalen van de condensatietemperatuur bij lage omgevingstemperatuur wordt, zoals reeds genoemd in hoofdstuk 2, eveneens gelimiteerd bij toepassing van thermostatisch expansieventielen om de verdamper goed gevuld te houden. Het kunstmatig hoog houden van de condensatietemperatuur leidt tot een verslechtering van de koudefactor (COP) [3].

Door toepassing van een 2-toeren elektromotor kan in bovengenoemde regeling het aantal stappen worden uitgebreid en kan de koudefactor van de installatie verbeterd worden [2].

Capaciteitsregeling van schroefcompressoren door verkleining van de effectieve rotorlengte door middel van een regelschuif is een traploze regeling, waarmee de zuigdruk nauwkeurig geregeld kan worden. Het belangrijkste nadeel van deze regeling is echter dat de deellast-verliezen aanzienlijk zijn.

Continue toerenvariatie door frequentieregeling, zowel bij zuiger- als schroefcompressoren, heeft als belangrijk voordeel dat de zuigdruk nauwkeurig geregeld kan worden en dat tijdens deellastbedrijf de koudefactor (COP) van de installatie gelijk blijft of zelfs toeneemt. Een additionele energiebesparing treedt op bij frequentieregeling ten opzichte van getrapte regeling doordat het drukniveau van de condensordrukregeling op een lagere waarde kan worden ingesteld. Het gevaar van flashgas vorming voor het expansieventiel is bij traploze regeling van de koelcapaciteit namelijk nauwelijks aanwezig.

Volgens de hier beschreven regeling is de verdampingstemperatuur van de verschillende koudegebruikers ongelijk en meestal zo ingesteld dat de koudegebruiker met de laagste temperatuur instelling goed kan werken. Dit houdt in dat ook als deze koudegebruiker is uitgeschakeld er toch op een relatief lage verdampingstemperatuur wordt gewerkt. Dit heeft een lagere koudefactor tot gevolg. Ook bij toepassing van zuigdrukregeling, door middel van een geregeld smoororgaan tussen verdamper en compressor, verschillen weliswaar de verdampingstemperaturen van de koudegebruikers maar wordt de zuigdruk voor de compressor op de laagste waarde ingesteld.

Door het kiezen van een grotere differentie tussen inschakel- en uitschakelpunt van de zuigdruk en tevens het alleen toestaan dat compressoren op vollast draaien kan een koelinstallatie energiezuiniger worden gemaakt. Door de grotere zuigdrukdifferentie en andere in de regeling opgenomen voorwaarden wordt er voor gezorgd dat de compressoren lange perioden op vollast draaien en weinig schakelen. Hierdoor wordt de installatie energiezuiniger dan in de situatie met veel schakelende en op deellast draaiende compressoren.



Door een zekere mate van coördinatie tussen de koudegebruikers aan te brengen is het mogelijk om op energie te besparen. De koudegebruikers kunnen bijvoorbeeld op basis van de benodigde verdampingstemperatuur in groepen worden in- en uitgeschakeld. De gebruikers met een relatief lage verdampingstemperatuur worden op de gewenste temperatuur gebracht als de gebruikers met een hogere verdampingstemperatuur zijn uitgeschakeld en vice versa. Deze methode van regelen waarbij er coördinatie tussen de koudegebruikers plaats vindt wordt in het volgende hoofdstuk uitgebreid behandeld.

### 3.2.3 Regelen op basis van compressor vollastbedrijf

De kern van het systeem is dat er een zodanige coördinatie tussen de koudegebruikers is dat de compressoren van een centrale installatie in vollast werken of uitgeschakeld zijn.

*Mogen/moeten-regeling:*

De belangrijkste kenmerken van deze regeling zijn:

- compressoren werken op vollast of zijn uitgeschakeld;
- de verdampingstemperatuur wordt op een zo hoog mogelijke waarde geregeld;
- koudegebruikers met een identieke verdampingstemperatuur worden als groep gekoeld;
- beheersing van het warmte-aanbod en -afname ten behoeve van warmteterugwinning.

Het principe van de regeling is als volgt. De door RBK Automatisering ontwikkelde “Balansregeling” berekent welke compressor/koudegebruikercombinatie ingeschakeld moet worden aan de hand van de capaciteitsgegevens van de koelcompressoren en de koudegebruikers. Er wordt dus vooraf bepaald welke combinatie van koelcompressoren en koudegebruikers de juiste verdampingstemperatuur oplevert. Dit voorkomt pendelen van koelcompressoren en van koudegebruikers. Op deze manier wordt er naar gestreefd, afhankelijk van de producteisen, dat de compressor op vollast werkt. Deellastverliezen worden geminimaliseerd, wat kan resulteren in een aanzienlijke besparing op het energiegebruik.

Bij deze regeling worden voor elke koudegebruiker de grenswaarden (temperatuurdifferentie) ingesteld waarbinnen de ruimte-of producttemperatuur zich mag bewegen en tevens het minimale benodigde temperatuurverschil tussen het te koelen medium en de verdampingstemperatuur. Wanneer de heersende, door het systeem in stand gehouden, verdampingstemperatuur te hoog of te laag is voor een koudegebruiker zal het programma het inschakelen van deze gebruiker tot een minimum beperken. Indien de heersende verdampingstemperatuur precies goed is voor deze gebruiker zal het systeem proberen deze zo lang mogelijk ingeschakeld



te houden. Hierbij streeft het systeem steeds naar een zo hoog mogelijke instelwaarde voor de verdampingstemperatuur.

De hiervoor beschreven werkwijze heeft als resultaat dat koudegebruikers in groepen worden in- en uitgeschakeld door het systeem. De gebruikers met een relatief lage verdampingstemperatuur worden op de gewenste temperatuur gebracht als de gebruikers met een hogere verdampingstemperatuur zijn uitgeschakeld en vice versa.

Indien in het proces tevens de condensorwarmte wordt benut dan voorziet deze regeling eveneens in de mogelijkheid om de deze condensorwarmte zo efficiënt mogelijk in te schakelen. Wanneer er voldoende warmte wordt geproduceerd door de installatie zal het systeem zoveel mogelijk warmte gebruikers inschakelen. Hierbij wordt tegelijkertijd gekeken of de warmteproductie kan worden beperkt door het uitschakelen van koudegebruikers. Andersom geldt dat wanneer de warmteproductie te klein is het systeem zal proberen om zoveel mogelijk warmtegebruikers uit te schakelen en zoveel mogelijk koudegebruikers in te schakelen.

## 4. Interne regelkring van de koelkringloop

De functie van de interne regelkring is het in stand houden van het drukverschil tussen condensor en verdamper en het regelen van de koudemiddelstroom door het smoorventiel. De keuze van de interne regelkring van de koelkringloop is afhankelijk van de situatie of **droge-** of **natte** verdamping wordt toegepast. Het droge verdampingssysteem wordt ook wel het directe expansie systeem genoemd (DX), het natte verdampingssysteem ook wel circulatie- of pompsysteem. De regeling van de koudemiddelmassastroom naar de verdamper, een belangrijk onderdeel van de interne regelkring, wordt voor beide verdampingssystemen in dit hoofdstuk behandeld. De regeling van de condensordruk, eveneens deel uitmakend van de interne regelkring, komt, waar van toepassing, aan de orde.

### 4.1 Het droge verdampings- of directe expansiesysteem (DX)

Bij het droge of directe expansiesysteem (DX) is het smoorventiel (expansieventiel) direct geschakeld tussen het hoge druk gedeelte van de kringloop (condensor of vloeistofvat) en de inlaat van de verdamper, werkend op het lage drukniveau. Dit is weergegeven in figuur 8. De koudemiddelstroom door het expansieventiel is tevens de koudemiddelstroom naar de verdamper.

Globaal kunnen drie typen expansieregelingen worden onderscheiden:

- het thermostatisch expansieventiel;
- een verbeterde expansieregeling op basis van een thermostatisch expansieventiel;
- het elektronisch expansieventiel.

#### 4.1.1 Thermostatisch expansieventiel (TEV)

In het merendeel van de directe expansiesystemen wordt voor de interne regeling gebruik gemaakt van een thermostatisch expansieventiel (TEV). Naast het in stand houden van het benodigde drukverschil tussen condensor en verdamper, regelt het TEV de hoeveelheid koudemiddelstroom naar de verdamper zodanig dat er geen onverdampd koudemiddel (vloeistof) door de compressor wordt aangezogen.

Het TEV werkt volledig mechanisch. Door middel van een temperatuuropnemer (de bulb) op de verdamperuittrede wordt de doorlaatopening van het ventiel geregeld. Het ingangssignaal is de oververhitting (verschil tussen gastemperatuur aan het uiteinde van de verdamper en de bij de verdamperdruk behorende evenwichtstemperatuur) aan het eind van de verdamper. Als de overhittingstemperatuur in de verdamper toeneemt, stijgt de gasdruk in de bulb en wordt het ventiel verder opengestuurd. De koudemiddelstroom naar de verdamper neemt toe waardoor de oververhitting zal afnemen, en vice versa. De capaciteit van de verdamper wordt met

name bepaald door het natte kookoppervlak. Een toename van de oververhitting betekent een afname van het kookoppervlak en het daarvan afhankelijke koelvermogen van de verdamper.

De doorlaatopening van een thermostatisch expansieventiel wordt bepaald door de mate van oververhitting van het koudemiddel. De koudemiddelmassastroom naar de verdamper wordt echter bepaald door de doorlaat van het ventiel en door het drukverschil tussen condensor en verdamper. Een afname van het drukverschil over het ventiel (ten gevolge van een verlaging van de condensatietemperatuur of verhoging van de verdampingstemperatuur) resulteert in een afname van de koudemiddelstroom. Om het kleinere drukverschil te compenseren, zal een thermostatisch expansieventiel een grotere doorlaat vragen, wat alleen kan worden gerealiseerd door een toename van de oververhitting. De verdamper moet de extra oververhitting leveren, wat een afname van het koelvermogen van de verdamper betekent. Thermostatische expansieventielen zijn hierdoor zogenaamde proportionele regelaars, omdat ze slechts bij het ingestelde werkpunt van verdampings- en condensatietemperatuur de optimale oververhitting realiseren. Voor een goede werking van het TEV is een oververhitting van circa 7 tot 15 K nodig. De belangrijkste voordelen van het thermostatisch expansieventiel zijn de lage prijs en de bedrijfszekere werking.

Bij de meeste koelinstallaties uitgerust met thermostatische expansieregeling wordt condensordrukregeling toegepast om de druk (en de temperatuur) in de condensor kunstmatig hoog te houden, door bijvoorbeeld afschakeling of toerenreductie van de ventilatoren bij luchtgekoelde condensors (of regeling van de waterstroom bij watergekoelde condensors). Dit betekent dat ook bij een lage omgevingstemperatuur de condensatietemperatuur en druk relatief hoog wordt gehouden. Onafhankelijk van de buitentemperatuur vindt de condensatie plaats bij eenzelfde relatief hoge temperatuur en druk. Het voordeel van condensordrukregeling is dat ook bij een lage omgevingstemperatuur het drukverschil tussen condensor en verdamper zodanig groot blijft dat de oververhitting in de verdamper op een kleine waarde geregeld wordt. Hierdoor blijft de koelcapaciteit van de installatie voldoende groot. Het kunstmatig continu hoog houden van de condensatiedruk heeft echter een negatieve invloed op het energiegebruik van de installatie doordat de compressor(en) altijd het grote drukverschil moeten handhaven.

#### **4.1.2 Verbeterde expansieregeling op basis van een thermostatisch expansieventiel**

Bij toepassing van een verbeterde expansieregeling op basis van een thermostatisch expansieventiel wordt ook bij lagere condensatietemperaturen, afhankelijk van de buitentemperatuur, de verdamper optimaal gevuld. De compressor(en) werken dan een groot gedeelte van de tijd met lagere drukverschillen waardoor de in-

stallatie energiezuiniger kan worden bedreven. Tevens worden de compressoren lager belast en wordt de looptijd verminderd.

Twee van deze apparaten worden in de volgende subparagrafen beschreven, namelijk een apparaat dat de overhitting gering houdt (Cooltronic) en een drukverhogingsunit.

#### *Cooltronic*

De Cooltronic is een verbeterde expansieregeling, gebaseerd op een conventioneel thermostatisch expansieventiel. Het is weergegeven in figuur 9. De Cooltronic bestaat uit een verwarmingselement dat op de bulb van het TEV bevestigd wordt, een vloeistofsensoren die in de zuigleiding geplaatst wordt en een elektrisch gedeelte dat de mate van bijverwarming regelt. Indien de oververhitting in de verdamper te groot wordt dan wordt via een verwarmingselement extra warmte aan de bulb van het thermostatisch expansieventiel toegevoerd, waardoor de koudemiddelstroom vergroot wordt. De oververhitting wordt op deze manier ook bij condities afwijkend van het ingestelde werkpunt minimaal gehouden. Het gevolg is een beter bevoelde verdamper waardoor de koelcapaciteit wordt verbeterd. Ook bij deze Cooltronic regeling kan, indien mogelijk, de condensatietemperatuur worden verlaagd.

De oververhitting van deze verbeterde expansieregeling bedraagt circa 2 à 3 K. Omdat voor een goede ventielwerking een minimaal verschil tussen condensatie- en verdampingsdruk vereist is kan de condensatietemperatuur niet onbepert verlaagd worden. Het drukniveau van de condensatiedrukregeling kan in vergelijking met een TEV op een lagere waarde worden ingesteld. De condensatietemperatuur volgt hierdoor meer de omgevingstemperatuur, wat een gunstige invloed heeft op het energiegebruik van het koelproces.

#### *Drukverhogingsunit*

Er bestaat een andere mogelijkheid om onafhankelijk van de condensatiedruk een goede werking van het thermostatisch expansieventiel te garanderen. Dit kan namelijk door toepassing van een drukverhogingsunit welke de druk van het vloeibare koudemiddel na de condensor door middel van een vloeistofpomp verhoogt. De condensatiedruk kan zo ver dalen als de omstandigheden mogelijk maken. Door toepassing van een drukverhogingsunit wordt de druk van het vloeibare koudemiddel na de condensor verhoogd tot de voor het thermostatisch expansieventiel optimale druk. De energie die nodig is om het koudemiddel in de vloeistoffase in druk te verhogen is veel geringer dan de energie welke wordt benodigd voor eenzelfde drukverhoging in de gasfase door de compressor. Door de lagere condensatiedruk wordt op compressorenergie bespaard. De condensorventilatoren (bij een luchtgekoelde condensor) behoeven ook niet meer zo vaak op en af te schakelen om zodoende een acceptabele voordruk op de expansieventielen te handhaven. Hierdoor komen er minder drukvariaties voor.

Als een verder voordeel van deze techniek kan genoemd worden dat bij een centraal systeem met meerdere koudegebruikers (meerdere verdampers) in principe maar één drukverhogingsunit, na de condensor unit, geïnstalleerd hoeft te worden.

### 4.1.3 Elektronisch expansieventiel (EEV)

Bij een elektronisch expansieventiel vindt er tussen de temperatuuropname op de verdamper en de doorlaat van het ventiel een extra verstaalslag plaats. De doorlaatopening van het expansieventiel wordt traploos geregeld via een “motor”-aandrijving welke wordt gestuurd door een elektronische regelaar. De regelaar regelt de naar de verdamper stromende hoeveelheid koudemiddel zodanig dat de oververhitting onder variërende omstandigheden op eenzelfde optimale waarde wordt gehouden en de verdamper optimaal gevuld blijft. De EEV zorgt dus voor een zo goed mogelijke bevoeiing van de verdamper bij een minimale stabiele oververhitting zonder dat vloeistof wordt doorgelaten naar de compressor. Dit betekent dat, omdat de verdampers meer koelcapaciteit leveren, er minder koelacties nodig zijn om het te koelen object op temperatuur te houden.

De oververhitting bij een elektronisch expansieventiel bedraagt circa 2 à 3 K. De elektronische ventielen zijn zogenaamde proportioneel integrerende, eventueel differentiërende, (PID) regelaars.

Het elektronisch expansieventiel functioneert ook goed bij lagere drukverschillen tussen de condensor en verdamper. Door de externe aandrijfkracht van het expansieventiel is het regelbereik aanzienlijk groter dan bij de traditionele expansieventielen, namelijk wel 10 tot 100%. Dit betekent dat deze ventielen groter kunnen worden gekozen zodat ze zowel bij een klein als groot drukverschil tussen condensor en verdamper de gewenste capaciteit kunnen leveren en er een grotere variatie in condensatiedruk is toegestaan. In de praktijk betekent dit dat de condensatiedruk bij een luchtgekoelde condensor, die bij traditionele ventielen op een minimum van 30 tot 35°C wordt gehouden, nu op een minimum van 15 tot 20°C kan worden gehouden. Dit betekent dat de koelcompressoren over het gehele jaar gezien effectiever werken en derhalve energie besparen. Deze besparing kan oplopen tot zo'n 20 à 30%.

In vergelijking met het TEV is het EEV aanzienlijk duurder. De terugverdientijd van de extra kosten ligt in de orde van 2 tot 3 jaar, afhankelijk van het gebruik van de koelinstallatie. De elektronische regelaars voor het aansturen van de ventielen beschikken dikwijls over een aantal aanvullende functies, zoals:

- nauwkeurige elektronische temperatuurregeling;
- complete ontdooi regeling (eventueel geoptimaliseerd);
- tijdschakeling op allerlei systeemfuncties;
- regeling van de compressor(en);
- alarmering;
- datacommunicatie waardoor diagnose, beheer en temperatuurregistratie op het werk of op afstand mogelijk is.

Deze regelingen vinden hun toepassing in de gehele keten van de voedingsmiddelenindustrie vanaf productie, via opslag tot in de gekoelde meubelen en cellen van supermarkten.

## 4.2 Het natte verdampingssysteem of circulatiesysteem

Bij het natte verdampingssysteem is meestal sprake van een expansieorgaan dat is aangebracht tussen het hoge druk gedeelte van de koelkringloop en het lage druk vloeistofvat. Door middel van een vloeistofpomp of via natuurlijke circulatie circuleert het koudemiddel vanuit het lage druk vloeistofvat door één of meerdere verdamperen, zoals weergegeven in figuur 10. Het vloeibare koudemiddel verdampt slechts ten dele in de verdamperen. Vervolgens stroomt het vloeistof/damp mengsel na de verdamper terug in de vloeistofafscheider. De koudemiddelmassastroom door het smoorventiel is dus niet gelijk aan de koudemiddelmassastroom naar de verdamper.

De vloeistofinspuiting door het expansieorgaan wordt geregeld op het vloeistofniveau van de afscheider. Voor koelmachines zijn er speciaal geconstrueerde niveau-regelaars ontwikkeld die goedkoop en betrouwbaar zijn. De vloeistofafsluiter die als smoororgaan dienst doet, wordt geopend en gesloten op een signaal van het niveauverschil. Dat niveau kan worden gemeten via een elektronisch verwarmde vloeistof-dampvoeler, een mechanische vlotter, een magneet of een condensator.

In tegenstelling met een direct expansiesysteem is bij een circulatiesysteem de koudemiddelstroom door de verdamper onafhankelijk van het drukverschil over het smoorventiel. Ten opzichte van directe expansiesystemen met een thermostatisch expansieventiel kan bij circulatiesystemen veelal het drukniveau van de condensordrukregeling op een lagere waarde ingesteld worden, wat een gunstig effect heeft op het jaargemiddelde energiegebruik van de installatie.

## 5. Globaal overzicht van toepassingsgebieden voor de diverse regelsystemen

Industriële koel- en vriesinstallaties zijn over het algemeen maatwerk producten en zijn ontworpen voor de specifieke eisen van de betreffende situatie. Voor welk regelsysteem in een industrieel koel- en/of vriessysteem gekozen wordt is onder meer afhankelijk van de volgende aspecten:

- het benodigde koelvermogen;
- het aantal koudegebruikers;
- de door de koudegebruikers gestelde (product) eisen (verdampingstemperatuur, koudevermogen);
- of het gaat om het bewaren en/of inkoelen/invriezen van producten;
- de gevraagde bedrijfszekerheid;
- de relatie met de productielijn waar het koel/vriesproces deel van uit maakt.

### *Hoofregelkring*

De aan-/uitregeling bij koelinstallaties is uitstekend geschikt voor die processen waarbij de installatie lange tijd op vollast moet draaien of lange tijd uitgeschakeld is, zoals bij continue verlopende inkoel- of invriesprocessen (inkoelen/invriezen van ijs, aardappelproducten, vlees, vis, groente) en bij die systemen waar een water- of ijsbuffer wordt toegepast.

De regeling waarbij er naar gestreefd wordt dat de compressor op vollast werkt is goed toepasbaar bij koel- en vrieshuizen en bij installaties met, bij voorkeur, meerdere inkoel- of invriestunnels. Hoe groter de bandbreedte waarbinnen de desbetreffende producttemperatuur zich mag bewegen, en de daarvan direct afhankelijk mate van koudebuffering in het product, des te beter is de "mogen/moeten" regeling toepasbaar. De temperatuurbandbreedte is bij vriesopslag over het algemeen groter dan bij gekoelde opslag, waardoor vriesbewaarcellen bij uitstek geschikt zijn voor deze regeling. Doordat er naar gestreefd wordt dat alle ingeschakelde koelcompressoren op vollast draaien, is het opgenomen elektrisch vermogen constant waardoor een bepaalde mate van "geregelde" piekshaving plaatsvindt. Tijdens de spertijd kan eventueel, indien het product dit toelaat, de temperatuur van de koudegebruikers op een hogere waarde worden ingesteld, waardoor eveneens op elektriciteitskosten bespaard kan worden. Ook bij processen met een kleinere temperatuurbandbreedte is deze regeling toepasbaar en zal deellastbedrijf worden geminimaliseerd.

Bij temperatuurgevoelige en/of uitdrogingsgevoelige producten zoals het bewaren van fruit kan de "mogen/moeten" regeling slechts beperkt ingezet worden. Veelal zal de benodigde compressorcapaciteit variëren om aan de gestelde producteisen te voldoen. De momentane compressorcapaciteit wordt hoofdzakelijk bepaald door de momentane koudevraag en binnen de door het product gegeven mogelijkheden wordt met behulp van de "mogen/moeten" regeling deellastbedrijf geminimali-



seerd. Door de wisselende benodigde compressorcapaciteit kan een toerengeregelde elektromotor voor de compressoraandrijving een aantrekkelijke energiebesparende optie zijn. Voordelen van toerenregeling zijn verder de eenvoudige regeling en de eenvoudige koeltechnische installatie omdat het, vanwege de goede deellastprestaties, aantrekkelijk is om ten opzichte van conventionele regeling met grotere compressoren te werken. Het aantal parallel geplaatste compressoren is hierdoor kleiner, wat resulteert in een eenvoudiger installatie. In verband met peak-shaving kan de wisselende benodigde compressorcapaciteit nadelig zijn.

Tabel 1 Basis capaciteitsregelingen.

Regeling	Toepassing	Opmerking
Aan-/uitregeling	Continue inkoel-/invriesprocessen (ijs, aardappelproducten, vlees etc) Processen met water- of ijsbuffer.	De regeling is zeer eenvoudig.
Regelen op zuigdruk, (deellastregeling, vergrote zuigdrukdifferentie)	Temperatuur- en/of uitdrogingsgevoelige producten: fruit, landbouwproducten. Systemen met slechts enkele koudegebruikers	Capaciteitsregeling door continue toerenregeling is een aantrekkelijke optie voor deellastregeling.
Regelen op compressor vollastbedrijf (mogen/moeten)	Koel- en vrieshuizen, algemeen toepasbaar bij installaties met meerdere (gelijksoortige) koudegebruikers.	Hoe groter de toelaatbare temperatuurbreedte des te beter toepasbaar. Ook toepasbaar bij kleinere bandbreedtes, alleen zal deellastbedrijf meer optreden.

#### *Interne regelkring*

De keuze voor het type verdampingssysteem is voornamelijk afhankelijk van het benodigde koelvermogen en ook van het soort koudemiddel. Bij ammoniak wordt vrijwel altijd natte verdamping toegepast. In het algemeen geldt dat voor de kleinere koelvermogens directe expansie systemen economisch aantrekkelijker zijn dan pompsystemen. Bij welk koelvermogen het omslagpunt ligt is sterk afhankelijk van de specifieke situatie. Als zeer globale richtlijn wordt wel aangegeven dat natte verdamping aantrekkelijk is wanneer het geïnstalleerde koelvermogen minimaal 100 kW bedraagt en het aantal bedrijfsuren per jaar hoog is. Bij een koelvermogen van 200 kW is natte verdamping bijna altijd aantrekkelijker. Afhankelijk van de eisen van de eindgebruiker, het aantal koudegebruikers, het aantal bedrijfsuren, etc. kan hiervan in de praktijk worden afgeweken.

## 6. Praktijkcases

### 6.1 Toepassing van elektronische expansieventielen in een supermarkt met een koel- en een vriesinstallatie

In een middelgroot supermarktfiliaal is door TNO [5] het energiegebruik van de koel- en de vriesinstallatie gemeten, waarbij de installatie afwisselend werd bedreven met thermostatische expansieventielen en elektronische expansieventielen. De vriesinstallatie bevat 2 meubelen (vrieseiland en glasdeurkast) en de koelinstallatie 6 meubelen en 2 koelcellen.

Het energiegebruik is telkens over één week gemeten, waarbij afgewisseld werd tussen een week met thermostatische expansieventielen en een week met elektronische expansieventielen. Verder zijn de vergelijkende metingen uitgevoerd bij een voor beide ventielen gelijke (standaard condensatietemperatuur van circa 30°C) en voor een verlaagde condensatietemperatuur bij toepassing van de elektronische ventielen.

Het energiegebruik betreft zowel de aandrijving van de koel- en vriescompressoren, de aandrijving van de condensorventilatoren en het energiegebruik van de elektrische verbruikers in de meubelen (verdamperventilatoren, verlichting, ont-dooiing e.d.). De toepassing van elektronische ventielen in plaats van thermostatische ventielen heeft in de eerste plaats een verlaging van het opgenomen vermogen van de koel- en vriescompressoren tot gevolg. Bij toepassing van elektronische ventielen in combinatie met condensordrukverlaging neemt het energiegebruik van de condensorventilatoren toe. Het energiegebruik voor de verlichting e.d. is in beide gevallen nagenoeg constant.

De jaargemiddelde besparing zonder verlaging van de condensatiedruk bedraagt bij toepassing van de elektronische ventielen ten opzichte van de thermostatische ventielen circa 5%, bij verlaging van de condensatietemperatuur loopt de jaargemiddelde besparing op tot circa 12%.

De jaargemiddelde reductie van het elektriciteitsgebruik met 12% betekende in deze praktijksituatie een besparing op de elektriciteitskosten van ongeveer f 2860,- per jaar. De meerinvestering voor de installatie met elektronische ventielen bij deze supermarkt bedroeg f 10.500,- zodat de eenvoudige terugverdientijd hier 3,7 jaar is.

## 6.2 Toepassing van toerengeregelde compressoren bij het inkoelen en bewaren van fruit

Aan een centrale koelinstallatie voor het bewaren van fruit zijn door TNO energiegebruiksmetingen [6] uitgevoerd waarbij de installatie afwisselend werd bedreven met continue toerenvariatie door frequentieregeling en met conventionele cilinderafschakeling door zuigkleplichting. De centrale koelinstallatie bestaat uit 2 stuks 11 kW semi-hermetische compressoren en 9 gelijkwaardige cellen voor het inkoelen en bewaren van maximaal 700 ton fruit (appelen en peren).

Het energiegebruik van de koelcompressoren is telkens over 2 dagen gemeten, waarbij afgewisseld werd tussen 2 dagen met frequentieregeling en twee dagen met conventionele cilinderafschakeling.

Toepassing van continue toerenregeling door frequentieregeling leidt ten opzichte van conventionele regeling door cilinderafschakeling tot een vermindering van het energiegebruik door het aanzienlijk hogere deellast rendement bij continue toerenregeling. Bij gebruik van thermostatische expansieventielen treedt door toepassing van frequentieregeling, een additionele energiebesparing op, omdat de condensatiedruk verlaagd kan worden. Dit vanwege de betere werking van het thermostatisch expansieventiel bij frequentieregeling door het ontbreken van snelle drukfluctuaties.

De metingen zijn uitgevoerd tijdens de bewaarperiode van het fruit. Tijdens de conventionele regeling met cilinderafschakeling werd de condensatietemperatuur ingesteld op 40°C en de verdampingstemperatuur op -7°C. Tijdens de continue toerenvariatie met frequentieregeling werd de condensatietemperatuur ingesteld op 34°C en de verdampingstemperatuur op -5,5°C, waarbij het toerental van de koelcompressoren naar beneden toe gelimiteerd werd tot 1350 omwentelingen per minuut (45 Hz). Deze instellingen worden door de installateur van deze koelinstallatie in de praktijk gehanteerd. De bewaar temperatuur is gelijk voor beide capaciteitsregelingen en ligt, afhankelijk van het product, tussen de -1 en 2°C. De hogere verdampingstemperatuur van -5,5°C in het geval van de frequentieregeling is gekozen om het compressortoerental laag te houden en een langere looptijd van de compressor te krijgen.

De besparing op het elektriciteitsgebruik bedraagt 22%. In deze specifieke situatie bedraagt de meerinvestering van de frequentieregeling  $f$  500,-, omdat in plaats van 3 compressoren bij conventionele regeling, nu slechts 2 compressoren nodig bleken. De capaciteit van een frequentie geregelde compressor kan boven nominaal ingezet worden (60 Hz). Bij een bewaarperiode van 6 maanden bedraagt de besparing op elektriciteitsgebruik 3800 kWh. Bij een elektriciteitsprijs van  $f$  0,25/kWh is de jaarlijkse kostenbesparing  $f$  950,- en is de eenvoudige terugverdientijd kleiner dan 1 jaar.

### **6.3 Toepassing van de mogen/moeten-regeling op basis van compressor vollastbedrijf bij vrieshuizen**

Volgens de RBK Groep te Deventer is het door hen ontwikkelde regelsysteem inmiddels toegepast bij meer dan 20 centrale koelinstallaties variërend van 75 kW tot 1,2 MW geïnstalleerd compressor-aandrijfvermogen.

In de figuur 11 is het energiegebruik weergegeven van twee vrieshuizen met en zonder het mogen/moeten regelsysteem. Deze informatie is afkomstig van de RBK Groep. De besparing op energiegebruik bedraagt 30 à 35%. Opvallend is dat de regeling zodanig is dat met name de grootste besparing wordt gerealiseerd gedurende de hoog tariefperiode. Vanwege de grotere temperatuurbandbreedte bij vriesbe-  
waaropslag kan juiste deze regeling toegepast bij vrieshuizen een aanzienlijke besparing opleveren.

Gegevens over de terugverdientijd van het regelsysteem zijn niet bekend.

### **6.4 Toepassing van een drukverhogingsunit in een koelinstallatie**

Door Koeltechnisch Adviesburo Verhoef is een onderzoek in een praktijksituatie uitgevoerd aan een eerste exemplaar van een drukverhogingsinstallatie welke op de markt wordt gebracht onder de naam "Ernvix" [8]. Een drukverhogingsinstallatie verhoogt de druk van het vloeibare koudemiddel na de condensor zodanig dat de expansieventielen optimaal kunnen functioneren terwijl de condensordruk op een lage waarde kan worden geregeld. Als gevolg hiervan wordt het energiegebruik van de compressorinstallatie verminderd. Een voordeel van de Ernvix is ook dat bij de start van een koelactie de koeler direct kan beginnen. Zonder Ernvix moeten de compressoren eerst druk opbouwen alvorens er koudemiddel naar de koeler gaat stromen. Dit levert naast energiebesparing ook een besparing op uitdroging van het product op. De drukverhogingsinstallatie wordt direct na de condensor(s) tussengebouwd en bestaat uit een vloeistofvat met direct daaraan gekoppeld een hermetisch gesloten pomp.

De Ernvix-unit is geïnstalleerd in een fruitkoelhuis van de Veiling Zaltbommel. De installatie is bedoeld voor 7 koelcellen voor de opslag van hard fruit, in hoofdzaak appels. De inslag van producten vindt meestal plaats in september en oktober en ze verlaten de opslag tussen maart en juni. De koelinstallatie bestaat uit twee zuigercompressoren met een opgenomen vermogen van 55/22 kW, twee luchtgekoelde condensoren en directe expansie verdamperen in de koelcellen. In verband met de installatie van de Ernvix drukverhogingsinstallatie is de regeling zodanig aangepast dat tijdens bedrijf van de Ernvix de condensatiedruk zo veel mogelijk verlaagd wordt zonder dat onnodig veel condensorventilatoren worden ingeschakeld.

Om het effect van de drukverhogingsunit onder praktijkcondities te onderzoeken zijn registrerende metingen onder stationaire condities en gedurende enkele weken onder praktijkcondities uitgevoerd.

Aan de hand van de meetresultaten is de energiebesparing op jaarbasis berekend. Voor de beschreven situatie is het toepassen van de drukverhogingsunit extra gunstig. Gedurende circa één maand, tijdens de inkoelfase, komen beide compressoren bij, omdat dan de totale koelcapaciteit wordt benodigd. Voor de overige tijd komt slechts één compressor in bedrijf terwijl wel het volledige condensoroppervlak beschikbaar blijft.

Over de beschouwde periode van oktober tot en met april is het elektriciteitsgebruik van de koelinstallatie gedaald van 55.656 kWh naar 37.023 kWh. De besparing bedraagt dus 18.633 kWh, zijnde 33,5%, wat bij een kWh-prijs van 13 cent een kostenbesparing van f 2.422,- per jaar betekent. De investering voor de drukverhogingsunit voor dit project was f 15.900,- excl. BTW zodat de eenvoudige terugverdiertijd circa 6,5 jaar bedraagt. De verwachting van de leverancier van de Ernvix dat de marktprijs voor de gebruiker in de toekomst op circa f 13.000,- excl. BTW zal uitkomen.

Naast de energiebesparing is in het onderzoek geconstateerd dat de uitdroging van het in de koelcellen opgeslagen product (appelen) is afgenomen met, naar schatting, circa 15%. Dit kan een belangrijke kwaliteitsverbetering van het product na opslag betekenen.

Als toepassingsgebied voor de Ernvix wordt door de leverancier vooral de supermarktbranche en de fruitbewaring in de koelcapaciteitsrange tot 150 kW genoemd.

### **6.5 Toepassing van een regeling op basis van compressor vollastbedrijf door middel van het vergroten van de zuigdrukdifferentie en het schakelen van de verdamperventilatoren bij een koel- en vrieshuis**

In het koel- en vrieshuis Antarctica Hattem B.V. te Hattem is na een modernisering van een gedeelte van alle koelinstallaties een PLC-regeling op de koelinstallatie geïnstalleerd [9]. De regeling is ontworpen en geleverd door de Hollander B.V. te Apeldoorn. Er is een energiebesparende regelstrategie toegepast op basis van compressor vollastbedrijf en op basis van het schakelen van verdamperventilatoren. Het voornaamste kenmerk van deze regeling is dat de bandbreedte van de zuigdruk tussen in- en uitschakelen van de compressor(en) is vergroot van de gebruikelijke 2K(+ of - 0.05 bar) naar 5K (+ of - 0.15 bar). De compressoren worden in volgorde geschakeld en draaien daarbij alleen op vollast. De besparing van deze regeling is onderzocht ten opzichte van een regeling met een zuigdrukdifferentie van 2K en het tevens op deellast draaien van de compressoren.

Tevens is de regeling voorzien van de mogelijkheid om de verdamperventilatoren in een bewaarcel uit te schakelen wanneer de koudemiddel toevoer naar een verdampster wordt onderbroken bij geen koudevraag.

De koelinstallatie is een zogenaamd pompsysteem met ammoniak als koudemiddel. Het compressoren gedeelte bestaat uit twee compressoren van 75 kW en drie compressoren van 37 kW opgenomen elektrisch vermogen. De installatie verzorgt de koeling van in totaal 17 koel- en vriescellen. Alle cellen zijn voorzien van ammoniak verdampers welke zijn aangesloten op één enkel afscheidervat welke op de zuigdruk wordt gehouden, behorende bij de laagste gewenste celtemperatuur.

Gedurende twee weken is er om de 24 uur op een vast tijdstip omgeschakeld tussen de regelingen op basis van 5K en 2K. Vervolgens is twee weken op dezelfde wijze gewisseld tussen bedrijf met continu draaiende verdamperventilatoren en bedrijf met de koudevraag mee aan/uit geschakelde verdamperventilatoren (hierbij is continu een zuigrukdifferentie van 5K aangehouden). Dit elke dag wisselen tussen de regelstrategieën is gedaan om zoveel mogelijk storende invloeden uit te bannen of uit te middelen, zoals weersinvloeden, be- en ontladen, weekendbedrijf etc.

Gemeten zijn de opgenomen elektrische vermogens van de gehele installatie, de aan/uit-tijden van de compressoren, de koelinstallatie- en bewaarceltemperaturen en de buitentemperatuur. Tevens is gecontroleerd of er geen grote verschillen zijn opgetreden in de hoeveelheid bij het bedrijf doorgeslagen product.

Over de meetperiode met verschillende zuigrukdifferenties is voor de regeling met een vergrootte zuigrukdifferentie over 10 dagen een verlaging van het elektriciteitsgebruik geconstateerd van 1.785 kWh (circa 14%).

Over de meetperiode met verschil tussen continu ingeschakelde verdamperventilatoren en met de koudelevering mee geschakelde verdamperventilatoren is over 12 dagen een besparing van 12.725 kWh (circa 48%) geconstateerd.

Het totale jaarlijkse elektriciteitsgebruik van het gehele koel- en vrieshuis bedroeg voor de renovatie 2.250.000 kWh. Het aandeel van de ammoniak koelinstallatie welke is voorzien van de beschreven regeling bedraagt naar schatting tweederde van dit totaalgebruik. Na de renovatie is het totale jaarlijkse energiegebruik verminderd met 529.000 kWh naar 1.721.000 kWh. De jaarlijkse besparing van het gebruik van de nieuwe regeling (zuigrukdifferentie 5K en schakelende verdamperventilatoren) op het gebruik van de ammoniakkoelinstallatie bedraagt daarmee circa 35%. Bij een kWh-prijs van 13 cent bedraagt de kostenbesparing f 68.770,--.

De investering voor de nieuwe regeling bedroeg f 19.000,--, zodat de eenvoudige terugverdientijd minder dan 4 maanden bedraagt..

Vanuit de meetresultaten is geen significant verschil tussen de diverse regelstrategieën geconstateerd in de stabiliteit van de temperaturen in de bewaarcellen.

## 7. Conclusies

- De afstemming van de vraag van de koudegebruiker en het aanbod van de koelinstallatie vormt de hoofdregelkring tussen koudegebruiker en koelinstallatie. De temperatuurregeling van de koudegebruiker en de capaciteitsregeling van de koelinstallatie maken onderdeel uit van de hoofdregelkring. De interne regelkring draagt zorg voor de afstemming van de diverse componenten binnen de koelinstallatie. De regeling van de koudemiddelmassastroom, de condensordruk en de zuig (verdampings)druk zijn belangrijke regelingen binnen de interne regelkring.
- De kenmerken van een energie-efficiënte regeling zijn:
  1. regelen op een zo hoog mogelijke verdampingstemperatuur,
  2. een zo laag mogelijke condensatietemperatuur
  3. een minimalisatie van compressorverliezen.
- De drie basis capaciteitsregelingen binnen de hoofdregelkring zijn: aan-/uitregeling, regelen op basis van de zuigdruk en regelen op basis van compressor vollastbedrijf. De onderstaande tabel geeft de toepassingsgebieden van de drie capaciteitsregelingen aan.

Regeling	Toepassing	Opmerking
Aan-/uitregeling	Continue inkoel-/invriesprocessen (ijs, aardappelproducten, vlees etc) Processen met water- of ijsbuffer.	De regeling is zeer eenvoudig.
Regelen op zuigdruk (deellastregeling, vergrote zuigdrukdifferentie)	Temperatuur- en/of uitdrogingsgevoelige producten: fruit, landbouwproducten. Systemen met slechts enkele koudegebruikers	Capaciteitsregeling door continue toerenregeling is een aantrekkelijke optie voor deellastregeling.
Regelen op compressor vollastbedrijf (mogen/moeten)	Koel- en vrieshuizen, algemeen toepasbaar bij installaties met meerdere (gelijksoortige) koudegebruikers.	Hoe groter de toelaatbare temperatuurbandbreedte des te beter toepasbaar. Ook toepasbaar bij kleinere bandbreedtes, alleen zal deellastbedrijf meer optreden.

- Bij aan/uitregeling wordt de compressor naar behoefte in- en uitgeschakeld, en wordt de zuigdruk niet geregeld. Dit is een zeer simpele, maar in het algemeen geen energiezuinige regeling.
- Bij de regeling op basis van zuigdruk wordt de zuigdruk op de gewenste waarde gehouden door variatie van de capaciteit van de compressor(en). Continue toerenalvariatie van de compressor door frequentieomvorming is de meest energie-efficiënte methode van capaciteitsregeling. De kostprijs van de frequentieregeling is de laatste jaren sterk gedaald en interessant geworden voor toepassing in de koeltechniek.



- Bij de regeling op basis van compressor vollastbedrijf vindt de capaciteitsregeling plaats door meer of minder koudegebruikers in te schakelen. Deellastverliezen blijven op deze manier tot het minimum beperkt, hetgeen energiebesparend werkt. Bovendien werken de compressoren niet onnodig op een lage verdampingstemperatuur, waardoor energiebesparing wordt bereikt.
- Binnen de interne regelkring is de wijze van regeling van de koudemiddelmasstroom door het smoorventiel afhankelijk van het toepassen van natte of droge verdamping.
- De smoorventielregeling bij natte verdamping is veelal gebaseerd op regeling van het vloeistofniveau in de afscheider. De momenteel verkrijgbare systemen functioneren goed en zijn betrouwbaar.
- De expansieregeling van droge verdampingssystemen (directe expansie) is duidelijk in ontwikkeling. De ontwikkeling van de zogenaamde verbeterde expansieregelingen is met name gericht op een optimale vloeistofvulling van de verdamper. Deze regelingen maken het tevens mogelijk om ook bij lagere condensatietemperaturen dan toepasbaar bij een thermostatisch expansieventiel de verdamper optimaal te benutten. Hierdoor kan gedurende een groot gedeelte van het jaar compressie bij een kleiner drukverschil plaatsvinden, waardoor de koelinstallatie energiezuiniger wordt bedreven. Verbeterde expansieregelingen hebben betrekking op apparaten in combinatie met een conventioneel thermostatisch expansieventiel of op een elektronisch ventiel.
- Een elektronisch expansieventiel is aanzienlijk duurder dan een thermostatisch expansieventiel. De terugverdientijd van de extra kosten ligt in de orde van 2 à 3 jaar.

#### Praktijkcases

- Toepassing van toerengeregelde compressoren bij het inkoelen en bewaren van fruit leverde ten opzichte van conventionele capaciteitsregeling door middel van cilinderafschakeling door zuigkleplichting, een energiebesparing van 22% op. In dit specifieke geval was de terugverdientijd minder dan één jaar.
- Toepassing van een vergrote zuigdrukdifferentie bij een capaciteitsregeling op zuigdruk en tevens het met de koudelevering mee laten schakelen van de verdamperventilatoren (in plaats van continu aan) leverde bij een koel- en vrieshuis een energiebesparing van 35 % op. De terugverdientijd is minder dan 4 maanden.
- De toepassing van een mogen/moeten regeling op basis van compressor vollastbedrijf leverde bij een vrieshuis een energiebesparing van 30 à 35% op. Gegevens over de terugverdientijd ontbreken.
- Toepassing van elektronische expansieventielen in een supermarkt leverde een jaargemiddelde reductie van 12% op. De terugverdientijd van de meerinvestering bedroeg 3,7 jaar.
- Toepassing van een drukverhogingsunit, een verbeterde expansieregeling op basis van een thermostatisch expansieventiel, in de koelinstallatie van een fruitkoelhuis, leverde een energiebesparing van 33% op. De terugverdientijd

bedroeg 6,5 jaar, bij verwachte toekomstige marktprijs zou de terugverdientijd 5,3 jaar bedragen.

## 8. Referenties

- [1] A.D. Koppenol, Energiebesparing met de frequentieregelaar bij koelcompressoren, Koude & Luchtbehandeling, nummer 5, mei 1992
- [2] A.D. Koppenol en W. van Zanten, Demonstratie van energiebesparing met de poolomschakelbare elektromotor bij koelcompressoren, Koeltechniek, nummer 1, januari 1989
- [3] K. van Heiningen, Energiebesparende regelingen en besturingen, Koeltechniek, nummer 3, maart 1983
- [4] B. Kortebach, Evenwichtige besturing voor koelinstallaties, Koude & Luchtbehandeling, nummer 11, november 1994
- [5] S.M. van der Sluis en J.P. van der Stoel, Het elektronisch expansieventiel: energiebesparing in de praktijk, Koude & Luchtbehandeling, nummer 2, februari 1994
- [6] B.J.C. van der Wekken, Energiebesparing door toepassing van toerengeregelde compressoren bij een praktijk koelinstallatie voor het inkoelen en bewaren van fruit, TNO-rapport R95-119, april 1995
- [7] E.A. Cosijn en J. van Male, Leergang ontwerpen van koelinstallaties: Compressoren, Koeltechniek, nummer 9, september 1977.
- [8] Koeltechnisch AdviesburoVerhoef, Praktijkonderzoek naar de energiebesparing door een Ernvix drukverhogingsunit in een koelinstallatie, Rapport JH.464.016, augustus 1996.
- [9] H. Schiphouwer, Demonstratie energiezuinige regeling van de ammoniak koelinstallatie bij koel- en vrieshuis Antarctica Hattem B.V., TNO-rapport R97/054, februari 1997.

## 9. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Novem Utrecht  
t.a.v. Ing. J. van de Velde  
Postbus 8242  
3503 RE Utrecht

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Ing. H. Schiphouwer  
Ir. B.J.C. van der Wekken

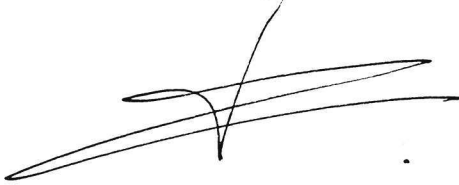
Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

n.v.t.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

maart 1995 - oktober 1998

Ondertekening:



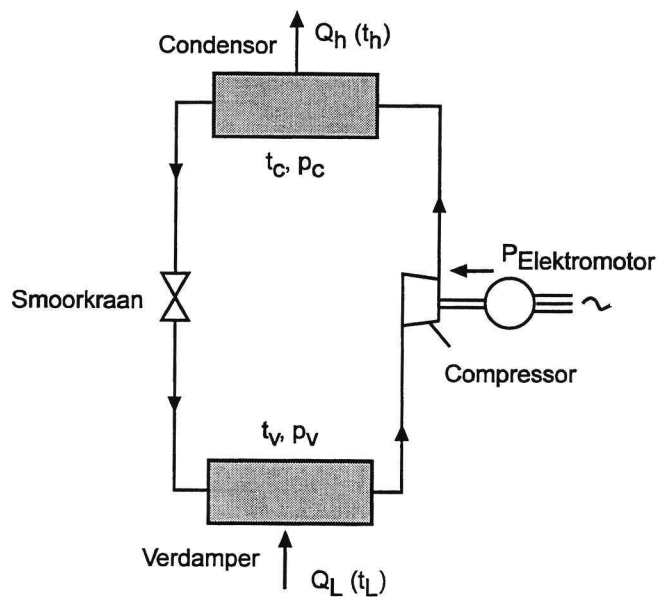
Ing. H. Schiphouwer  
projectleider

Goedgekeurd door:

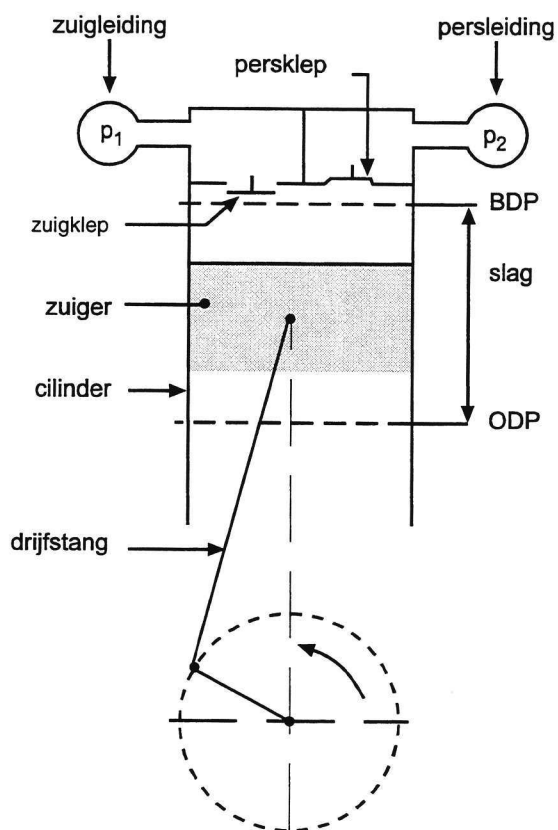


Ir. R.J.M. van Gerwen  
afdelingshoofd

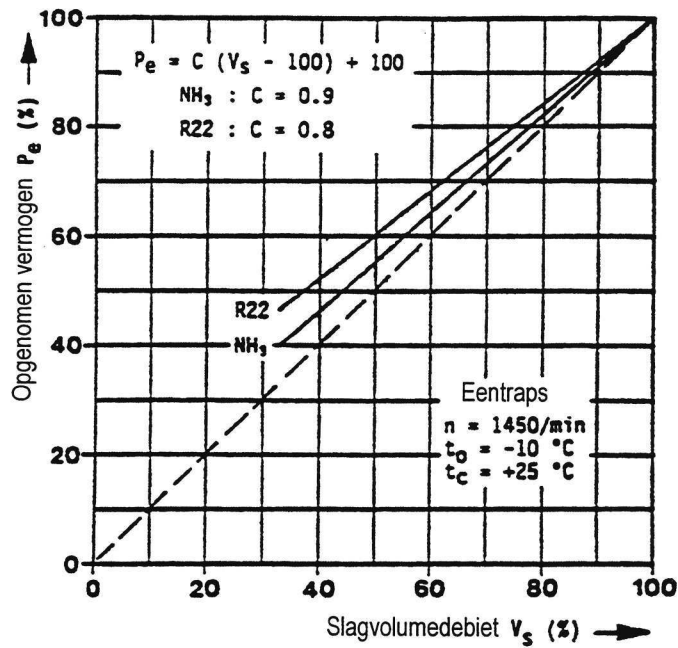
## Figuren 1 t/m 11



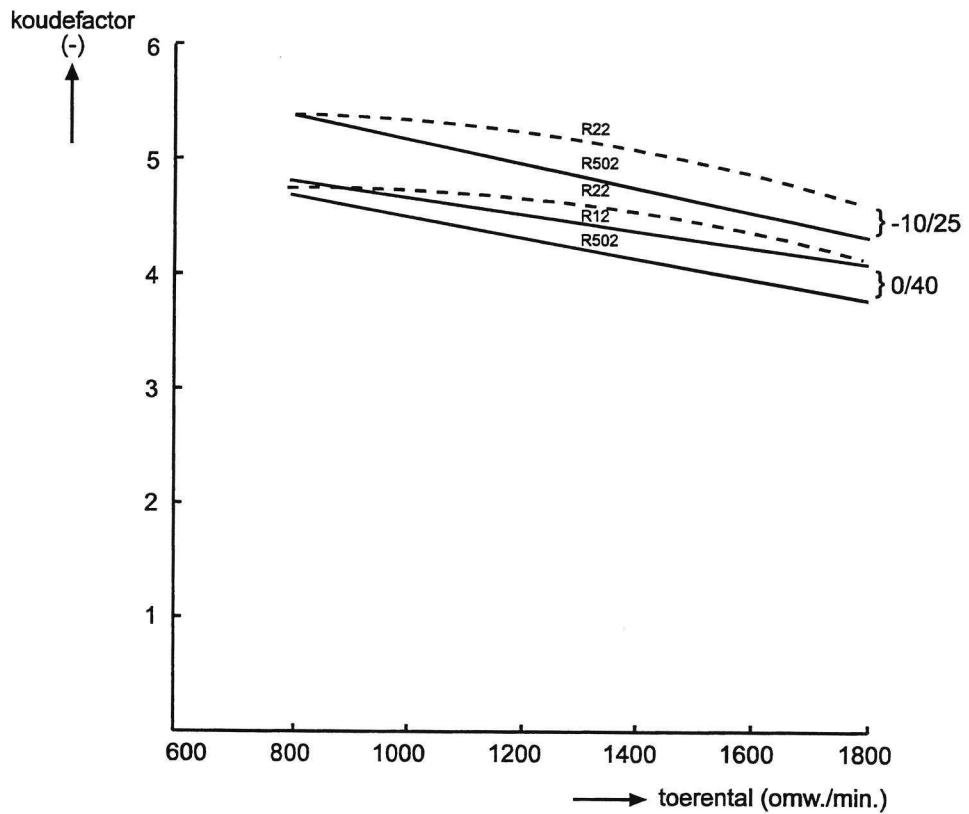
Figuur 1 Eenvoudige compressiekoelmachine kringloop



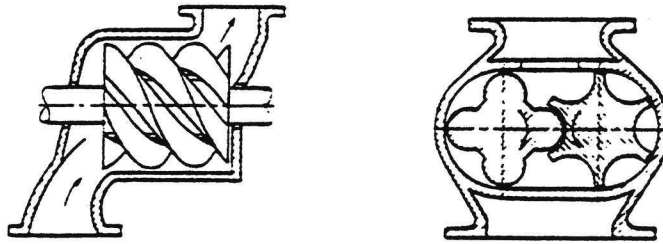
Figuur 2 Schema zuigercompressor



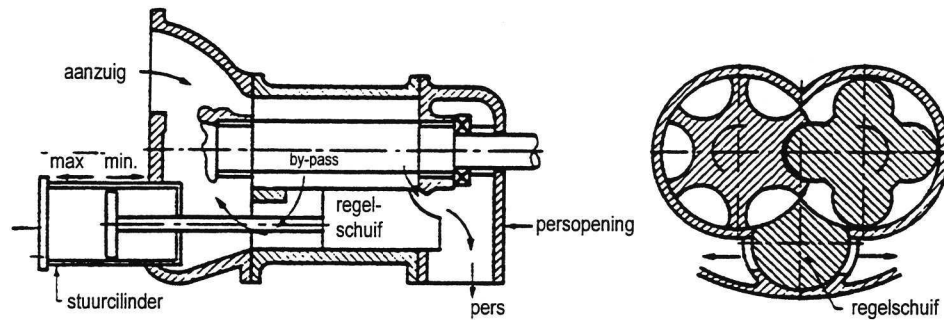
Figuur 3 Deellast energiegebruik bij zuigkleplichting



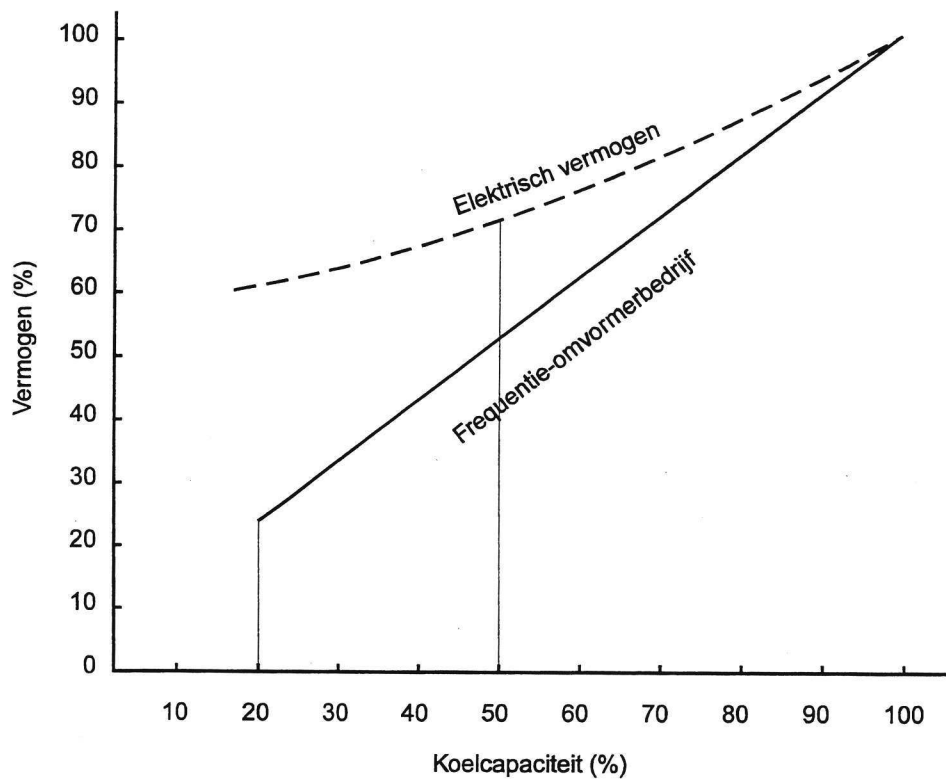
Figuur 4 Koudefactor als functie van het toerental



Figuur 5 Schema schroefcompressor (Stal)

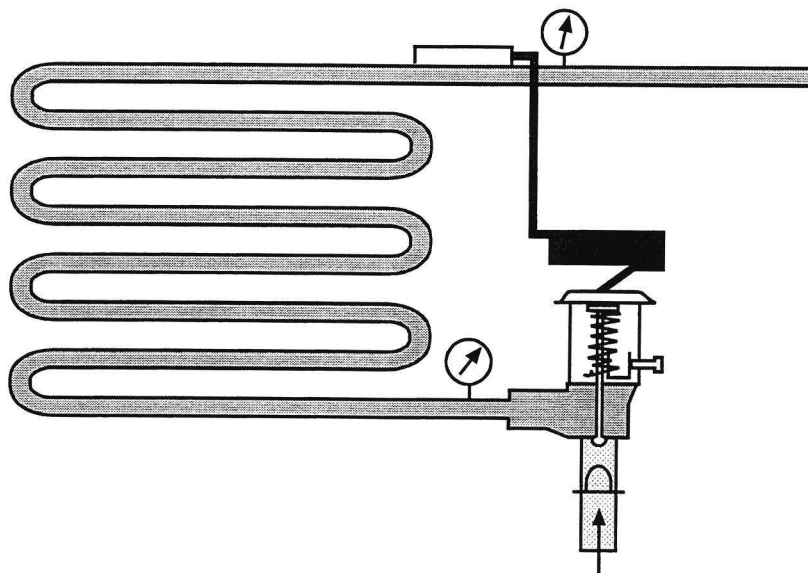


Figuur 6 Schema capaciteitsregeling van een schroefcompressor door middel van een regelschuif

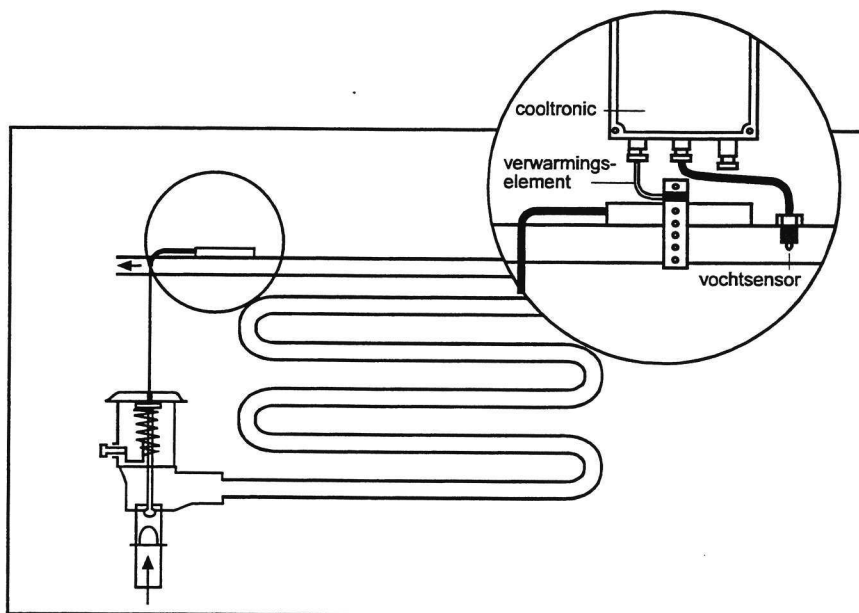


Figuur 7 Deellast vermogen van een conventioneel geregelde en frequentie-geregelde schroefcompressor (Stal)

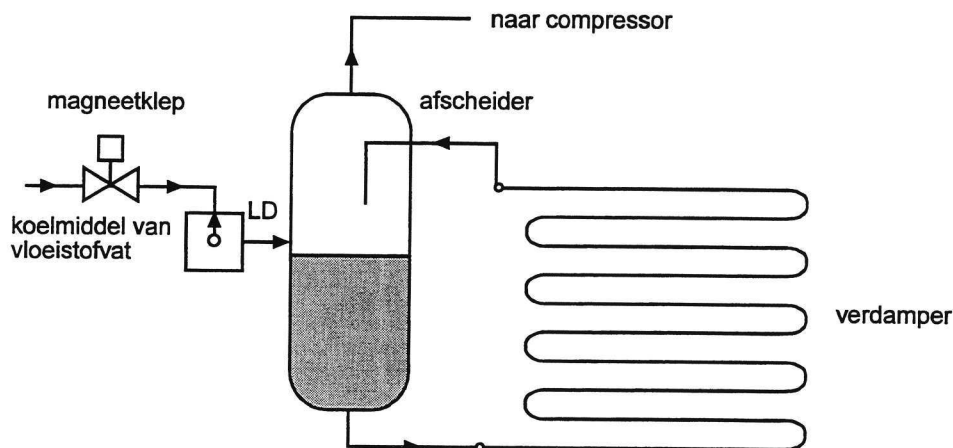




Figuur 8 Thermostatisch expansieventiel met droge verdamper

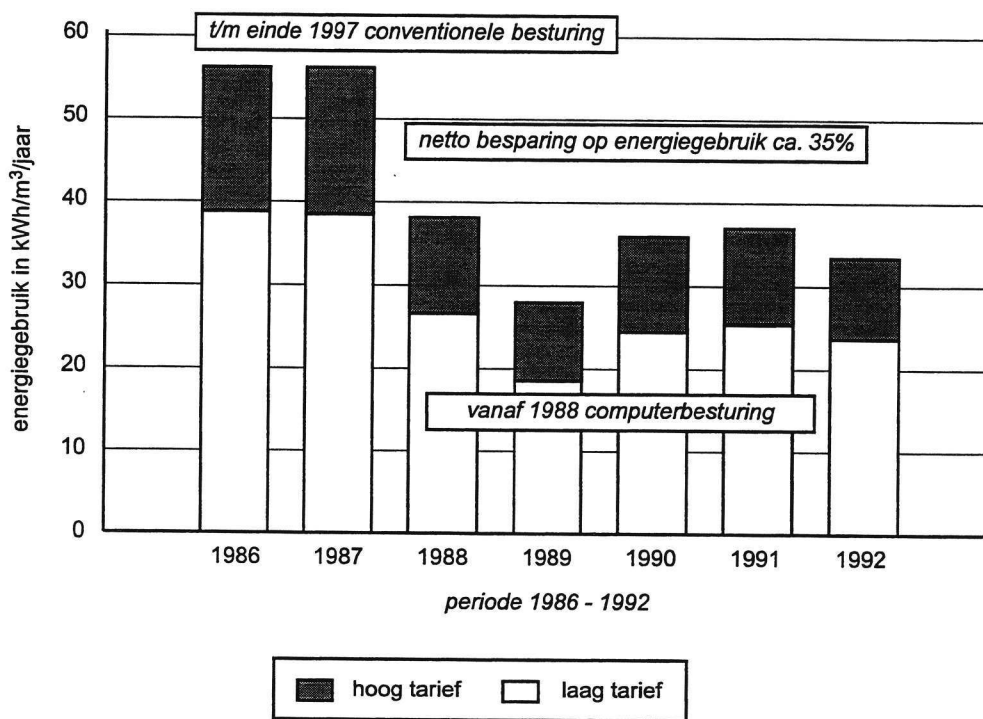


Figuur 9 De Cooltronic expansieregeling in combinatie met een conventioneel thermostatisch expansieventiel



Figuur 10 Koelsysteem met natte verdamping

**Energiegebruik vrieshuis 1 met en zonder CoCo systeem**



Figuur 11 Energiegebruik met en zonder regeling op basis van compressorvlastbedrijf (Het door Kortenbach ontwikkelde systeem wordt ook het CoCo systeem genoemd (Coldstore Control))