

4. KLIMAATREGELING

4.1 Functies, voorzieningen en systemen

Onder "klimaatregeling" verstaan we: het met installatietechnische of bouwkundige voorzieningen beheersen van het binnenklimaat. Deze voorzieningen kunnen de volgende functies hebben:

- verwarming
- koeling
- luchtverversing
- vochtregeling

Er bestaan vele voorzieningen en systemen [33]. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste systemen per functie in hoofdlijnen besproken en in hoofdstuk 5 de complexere systemen met meer-voudige functies. Meer details zijn te vinden in [34][35][36][37]. Uitgebreidere toelichtingen zijn te vinden in [63].

4.2 Verwarming

4.2.1 **Onderscheid**

Bij verwarming maken we onderscheid tussen *lokale* en *centrale* verwarming. Bij centrale verwarming kan *water* of *lucht* als transportmedium dienen. Ook is onderscheid naar de gebruikte brandstof of warmtebron mogelijk. Zie figuur 4.1 voor een overzicht.

4.2.2 **Lokale verwarming**

Bij lokale verwarming bevindt zich in de te verwarmen ruimte een toestel waarin brandstof wordt verbrand of waarin een elektrisch element voor de productie van warmte zorgt. Lokale verwarming wordt op beperkte schaal in woningen en op vrij grote schaal in industriële gebouwen toegepast.

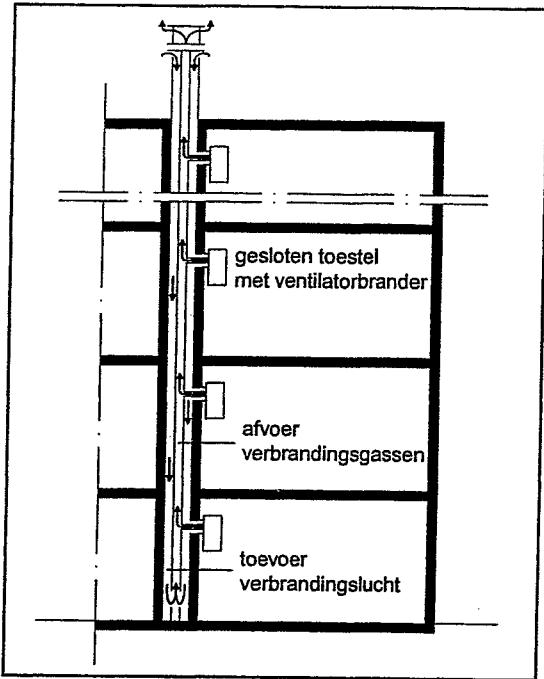
Woningen hebben lokale verwarming als het afgelegen (recreatie)woningen zijn of oudere woningen waarin aanleg van centrale verwarming te kostbaar of technisch niet mogelijk is. Gasgestookte kachels en soms elektrische radiatoren of luchtverwarmers zorgen voor de warmteproductie. Open haarden (met hout e.d. als brandstof) hebben een beperkt vermogen en dienen meestal als bij- of sfeerverwarming. Het gebruik van olie als brandstof neemt af vanwege de hoge milieueisen die aan de opslag worden gesteld. Als geen aardgas beschikbaar is past men vaak propaan of butaan toe. Deze gassen worden in vloeibare vorm in stalen gasflessen aangevoerd. Meestal plaatst men deze flessen buiten de woning in een geventileerde ruimte, waarin ze ook op de gasleiding worden aangesloten. Bij grotere installaties wordt het gas met tankwagens aangevoerd en in bovengrondse tanks opgeslagen. Vanwege brand- en explosiegevaar bevinden deze tanks zich meestal op enige afstand van de woning.

Industriële ruimten verwarmt men vaak lokaal met luchtverwarmers of infraroodstralers. Deze met aardgas, butaan of propaan gestookte toestellen worden meestal hoog in de ruimte aangebracht. Bij infraroodstralers komen de verbrandingsgassen ("rook") altijd in de ruimte vrij, bij luchtverwarmers alleen als ze geen rookafvoer hebben. Toestellen zonder rookafvoer past men alleen toe in hoge ruimten (>4,0m) die natuurlijk worden geventileerd via niet-afsluitbare openingen. Dit komt o.a. voor bij las- en montagehallen in de scheeps- en apparatenbouw. Bij werkplaatsen voor fijnmechanische industrie, autoreparatie e.d. - waaraan hogere klimaateisen worden gesteld - is een beter beheersbare verwarming en ventilatie nodig en is het gunstiger om centrale luchtverwarming toe te passen.

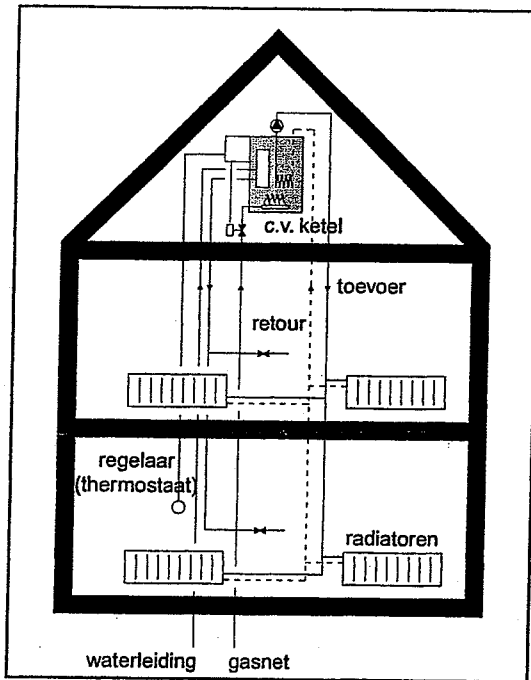
4.2.3 **Centrale verwarming met warm water**

4.2.3.1 **Werkingsprincipe**

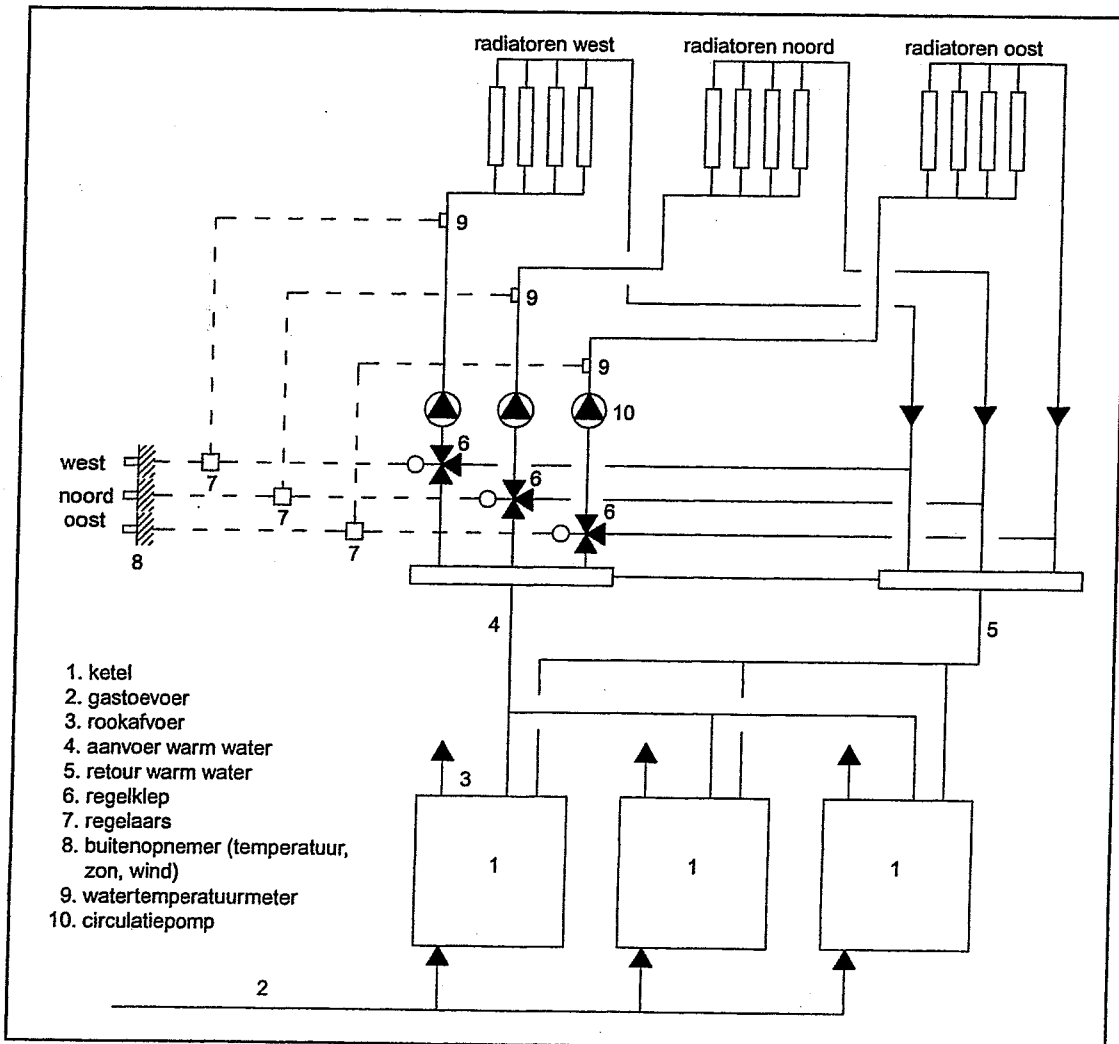
Bij centrale verwarming met warm water zorgen centraal opgestelde verwarmingsketels voor het op temperatuur brengen van het water, meestal met aardgas als brandstof (zie ook vorige paragraaf). In plaats van ketels worden ook wel warmtepompen toegepast (zie paragraaf 3.5.7) of sluit men aan op de stadsverwarming. Bij warmwater verwarming circuleert het water in een gesloten leidingsysteem en zorgt een pomp voor de circulatie. Radiatoren, convectoren e.d. zijn de eind-



System met combinatie van luchttoevoer en verbrandingsgassenafvoer (CLV-systeem) - Figuur 4.3



Schema centrale verwarming (combiketel) in woning met thermostaatregeling - Figuur 4.4



Schema centrale verwarmingssysteem utiliteitsbouw met meerdere ketels en verwarmingsgroepen - Figuur 4.5

apparaten waarmee de warmte van het water aan de ruimte wordt overgedragen. Een expansievat voorkomt dat een te hoge druk in het leidingsysteem ontstaat.

4.2.3.2 Leidingen

Voor verwarmingsleidingen werden tot de jaren '70 van de inmiddels vorige eeuw dikwandige stalen buizen gebruikt die met schroefdraadverbindingen en hennep of kunststoftape als afdichtingsmateriaal aan elkaar werden verbonden. Deze wijze van montage wordt "fitten" genoemd. Leidingen met een diameter van 50 mm en groter werden - en worden - aan elkaar gelast. Om corrosie tegen te gaan krijgen de leidingen enkele lagen menie en worden ze, als ze in het zicht komen, afgelakt. Na genoemde periode ging men voor de kleinere diameters verzinkte dunwandige stalen buis gebruiken, eerst in de woningbouw, later ook in de utiliteitsbouw. Dunwandige buizen worden met kneffittingen gemonteerd. Het is niet gebruikelijk om stalen leidingen in betonnen wanden of vloeren in te storten. Om vrij te kunnen uitzetten en krimpen hangt men ze met speciale beugels op. Leidingen passeren vloeren en wanden via doorvoerhulzen die met kunststof "rozetten" worden afgedekt.

Sinds halverwege de jaren '90 legt men bij woningen de aansluitleidingen van verwarmingslichamen steeds vaker in de dekvloer. Bij utiliteitsgebouwen is deze trend ook te zien. De dekvloer moet daarvoor ten minste 50 mm dik zijn en er mogen in de betreffende leidinggedeelten geen verbindingen zitten. Hierdoor ontstaat een stervormig leidingnet met in het centrum de aansluiting op de verwarmingsinstallatie. In dit punt bevindt zich een verdeel- en verzamelstuk ("verdeler") met voor elk verwarmingslichaam aparte aansluitingen (figuur 4.2). De leidingen in de dekvloer bestaan vaak uit kunststofbuizen die in kunststof beschermingsmantel toe of buizen die uit verschillende materialen zijn samengesteld (zoals PE / aluminium / PE). De buizen worden in rollen aangevoerd.

De aanvoer- en retourtemperatuur van centraal verwarmingswater is traditioneel 90 respectievelijk 70°C. Bij leidingen in dekvloeren kunnen deze temperaturen tot warmteschade aan de dekvloer of vloerafwerking leiden en is het beter om geen hogere watertemperatuur dan 60 °C toe te passen.

4.2.3.3 Verwarmingsketels

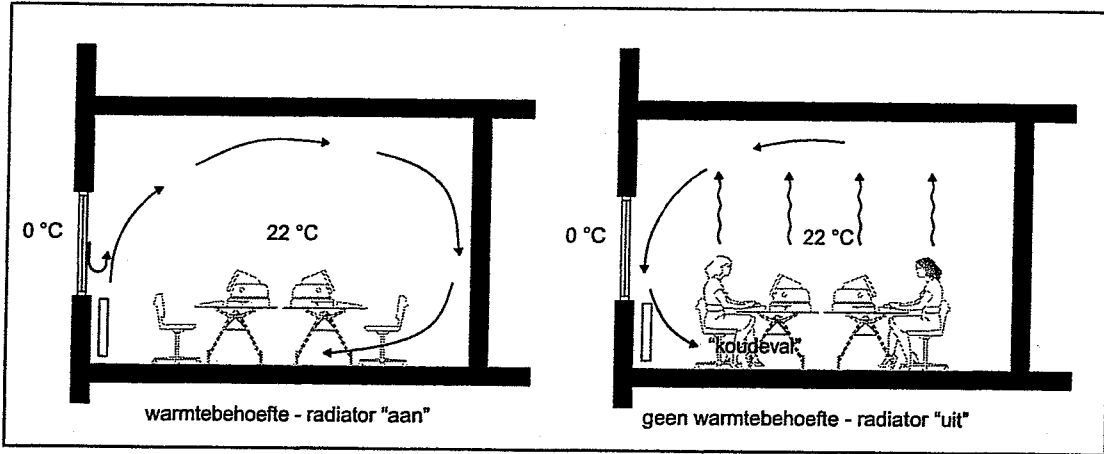
Verwarmingsketels kunnen *open* of *gesloten* zijn. Open ketels hebben atmosferische branders die hun verbrandingslucht uit de ruimte halen. De toepassing hiervan neemt af vanwege het lage rendement en daardoor lage energieprestatie. Gesloten ketels halen hun verbrandingslucht met een ventilatorbrander en een kanaal van buiten. Bij gestapelde woningen combineert men de verbrandingsluchtkanalen en rookkanalen wel tot een "buis in buis" constructie, het zogenaamde "CLV-systeem" (Combinatie van Luchttoevoer en Verbrandingsgasafvoer). Op dit systeem zijn maximaal 20 ketels van boven elkaar liggende woningen aan te sluiten (zie figuur 4.3).

4.2.3.4 Regeling

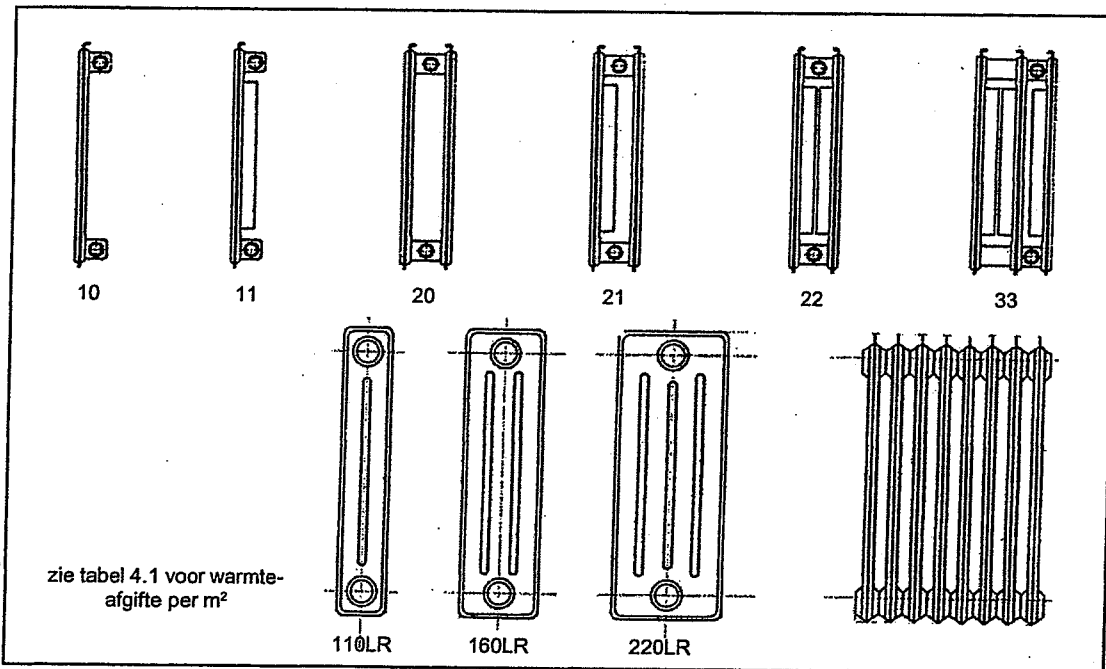
De centrale verwarming van woningen wordt meestal geregeld met een thermostaat in de woonkamer die de brander van de ketel beïnvloedt (zie figuur 4.4). De temperatuur van de overige vertrekken is met thermostatische radiatorcranken na te regelen. Bij utiliteitsgebouwen past men vaak aparte verwarmingsgroepen toe voor vertrekken met gelijke oriëntatie of gelijke functie (zie figuur 4.5). De watertemperatuur wordt dan per groep geregeld op basis van de buitentemperatuur met correcties voor de invloed van zon en wind. Ook bij deze groepen is de temperatuur per ruimte met thermostatische radiatorcranken na te regelen.

4.2.3.5 Radiatoren

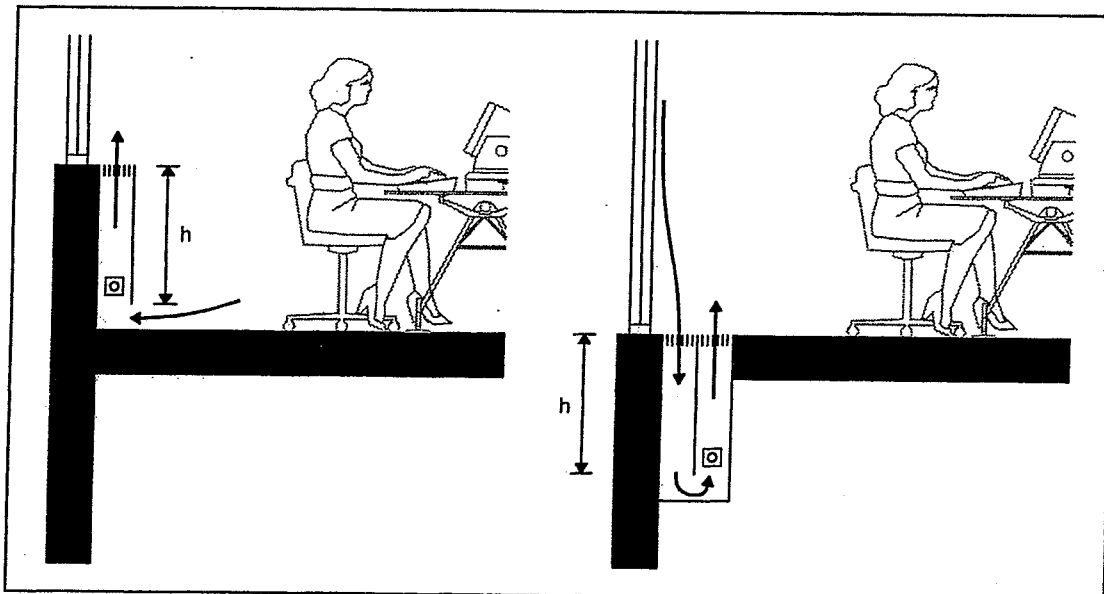
Met radiatoren is aan de in hoofdstuk 2 besproken comforteisen te voldoen mits de radiatoren zich bevinden op plaatsen waar het grootste warmteverlies optreedt, zoals bij ramen. Radiatoren kunnen daar - door hun hoge temperatuur - "koudestraling" compenseren, "koudeval" opvangen en - bij geopende ramen - tocht voorkomen. "Koudestraling" is het gevoel dat ontstaat als onbedekte huid door straling warmte verliest aan een koud oppervlak. Het lijkt op tocht. "Koudeval" is de neerwaartse luchtstroom die bij koude vlakken ontstaat en tocht veroorzaakt over de vloer, vensterbanken en tegen de koude vlakken aangeschoven tafel- of bureaubladen.



Radiatorverwarming en koudeval - Figuur 4.6



Verschillende types radiatoren - Figuur 4.7



Convectorschacht en convectorput - Figuur 4.8

Radiatoren zijn minder geschikt voor het verwarmen van hoge ruimten (>3,5 m) omdat ze beperkt invloed hebben op de luchtcirculatie, waardoor bovenin de ruimte een warme luchtdeken kan ontstaan. Dit verschijnsel doet zich minder voor in mechanisch geventileerde ruimten.

Bij veel interne warmteontwikkeling - bijvoorbeeld door personen en apparatuur - blijven radiatoren koud waardoor "koudestraling" niet wordt gecompenseerd, "koudeval" niet wordt opgevangen en de luchtstroom bij open ramen niet wordt verwarmd (figuur 4.6). Dit risico is te beperken door geen grote en/of hoge glasvlakken toe te passen of door die vlakken van extra isolerende glassoorten ("HR-glas") te voorzien dan wel ze als klimaatraam of klimaatgevel uit te voeren (zie paragraaf 4.8.3 e.v.) en door de ruimte mechanische te ventileren.

We kennen paneel-, leden- en designradiatoren. Verder zijn er paneelconvectoren, dat zijn paneelradiatoren waarvan de buitenoppervlakte is vergroot met geprofileerde platen of ribben aan de achterzijde of tussen de panelen in. Radiatoren en paneelconvectoren zijn er in hoogten van 200, 300, 400, 500, 600, 800 en 1000 mm. Designradiatoren hebben een glad oppervlak (vaak met ribben aan de achterzijde) of zijn samengesteld uit ronde of rechthoekige buizen. Ze zijn te leveren in standaard hoogten maar ook in langgerekte/lage of smalle/hoge vormen.

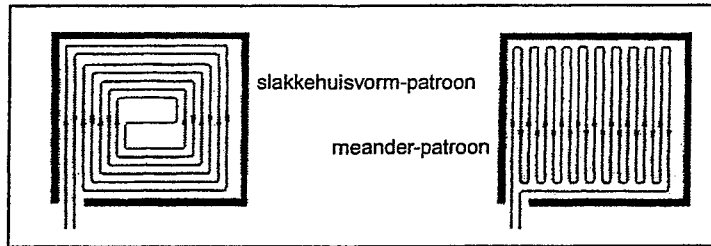
Het verwarmingsvermogen van radiatoren is evenredig met de oppervlakte, zie tabel 4.1. Deze tabel geldt voor een aanvoer- en retourtemperatuur van respectievelijk 90 en 70 °C. Bij radiatoren met aansluitleidingen in de deklaag van de vloer is het beter om geen hogere temperatuur toe te passen dan 60°C. Het verwarmingsvermogen is dan ongeveer de helft van de in tabel 4.1 aangegeven waarden.

Tabel 4.1 Verwarmingsvermogen radiatoren en paneelconvectoren per m² aanzichtoppervlakte (zie figuur 4.7)

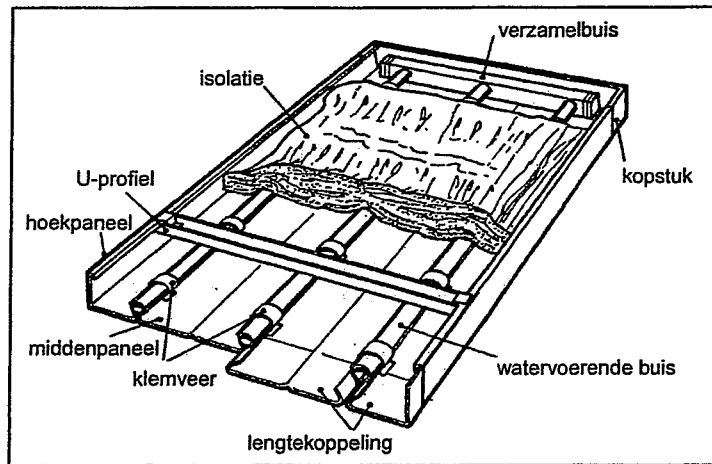
type		W/m ²
10	één- plaats paneelradiator	1300
11	één- „ paneelconvector	1900
20	twee- „ paneelradiator	2200
21	twee- „ paneelconvector	2700
22	twee- „ „	3300
33	drie- „ „	4500
110LR	twee-koloms ledenradiator	2400
160LR	drie- „ „	3300
220LR	vier- „ „	5000

4.2.3.6 Convectoren en ribbenbuizen

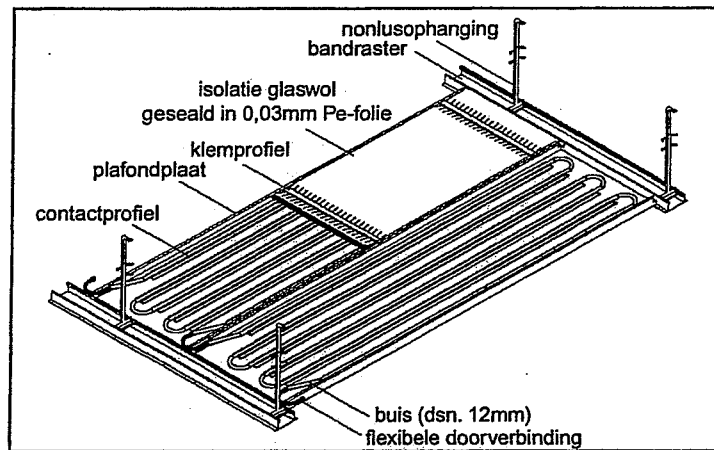
Convectoren zijn buizen waarvan de oppervlakte is vergroot met dunne metalen plaatjes ("lamellen"). Ribbenbuizen zijn steviger omdat voor de ribben dikkere metalen plaat wordt gebruikt. Net als radiatoren zijn ribbenbuizen vrij op te hangen. Convectoren en ribbenbuizen geven moeten in een omkasting of convectorput zijn aangebracht. Convectoren en ribbenbuizen geven hun warmte hoofdzakelijk convectief af. Door een aantal elementen boven of naast elkaar te plaatsen is een verwarmingsvermogen van enkele duizenden Watts per strekkende meter te realiseren. Het vermogen van convectoren wordt beïnvloed door de hoogte van de schacht [36], zie figuur 4.8. Convectoren en ribbenbuizen moeten, net als radiatoren, zijn aangebracht op plaatsen waar het grootste warmteverlies optreedt. Door het ontbreken van compensatie voor "koudestraling" moet voor gelijk comfort de gevel een hogere isolatiewaarde hebben en de luchttemperatuur 0,5 tot 1,0 °C hoger zijn dan bij radiatorverwarming (vuistregel). Om met convectoren en ribbenbuizen op 0,6 m vanaf de gevel aan de gebruikelijke comforteisen voor verblijfsruimten te kunnen voldoen mag de gevel niet meer dan 30% transparant zijn. Deze vuistregel geldt voor dubbel glas. Bij hogere percentages moet HR-glas zijn toegepast of het glasvlak als klimaatraam of klimaatgevel zijn uitgevoerd. Net als radiatoren zijn convectoren en ribbenbuizen minder geschikt voor het verwarmen van hoge ruimten (>3,5 m) omdat ze een relatief geringe luchtcirculatie veroorzaken waardoor bovenin de ruimte een warme luchtdeken ontstaat. Dit verschijnsel doet zich in mindere mate voor in mechanisch geventileerde ruimten.



Spiraalvormen bij vloerverwarming - Figuur 4.9



Verwarmingsplafond met buizenregister (systeem Frenger) - Figuur 4.10



Verwarmingsplafond met in spiraalvorm gebogen buizen - Figuur 4.11



Voorbeeld van een gebogen verwarmingsplafond - Figuur 4.12

4.2.3.7 *Vloerverwarming*

Vloerverwarming bestaat uit metalen of kunststof buizen die in een slakkenhuisvorm of meanderpatroon in de dekvloer liggen (figuur 4.9). De makkelijk te buigen buizen worden "op rol" geleverd. Met een buislengte van 100 m is - afhankelijk van de van de buisafstand - 10 tot 20 m² vloer te verwarmen. Om lekkage te voorkomen is het beter om geen buisverbindingen in de dekvloer toe te passen. Daarom zijn bij grotere oppervlakten meer "vloervelden" nodig die apart worden aangesloten op een "verdeler" die goed bereikbaar in een kast of wand (achter een wegneembaar paneel) is geplaatst. De slakkenhuisvorm geeft de meest gelijkmatige vloertemperatuur. Met het meanderpatroon is plaatselijk, bijvoorbeeld bij een buitengevel, voor meer verwarmingsvermogen te zorgen. Warmteschade aan de dekvloer of vloerafwerking is te voorkomen door geen hogere watertemperatuur toe te passen dan 50 °C. Daarom wordt vloerverwarming bij toepassing in combinatie met radiatorverwarming meestal apart geregeld met een eigen regelset en een eigen circulatiepomp.

Vloerverwarming is meestal niet geschikt als hoofdverwarming. Dat komt door het beperkte vermogen maar ook doordat de warmte voor een groot deel niet wordt toegevoerd op de plaats waar het grootste warmteverlies optreedt zodat o.a. de koudeval bij ramen niet wordt opgevangen. Vloerverwarming is vooral bedoeld voor verwarming van vloeren boven onverwarmde ruimten en is ideaal in combinatie met radiatorverwarming of luchtverwarming. Het beperkte verwarmingsvermogen hangt samen met de vloertemperatuur die in ruimten waarin hoofdzakelijk wordt gezeten maximaal 28 °C en in ruimten waarin hoofdzakelijk wordt gestaan maximaal 25 °C mag zijn. Het verwarmingsvermogen is dan respectievelijk 90 en 55 W/m².

4.2.3.8 *Muurverwarming*

Voor muurverwarming kan hetzelfde materiaal worden gebruikt als voor vloerverwarming. Muurverwarming bevindt zich in een experimenteel stadium. Voorbeelden zijn te vinden in de woningbouw waar de verwarmingsbuizen in tussenwanden zijn opgenomen waarin makkelijk sleuven zijn te frezen, zoals gips of kalkzandsteen. Een nadeel van wandverwarming is dat de warmte niet wordt toegevoerd op plaatsen waar het grootste warmteverlies optreedt. Dit maakt muurverwarming ook minder geschikt als hoofdverwarming. Een ander bezwaar is dat door uitzetten en krimpen van de wand scheurvorming kan ontstaan, om die reden is het beter om geen hogere watertemperatuur toe te passen dan 40 °C. Het verwarmingsvermogen ligt dan, afhankelijk van de buisafstand, tussen 40 en 60 W/m².

4.2.3.9 *Plafondverwarming*

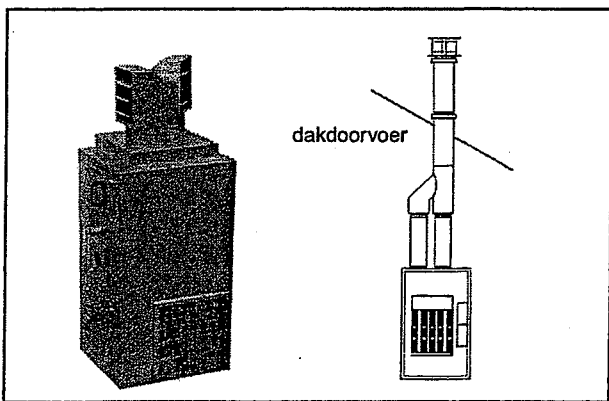
Verwarmingsplafonds kunnen metalen stroken of cassettes zijn die aan buizenregisters worden geklemd. Registers bestaan uit evenwijdig lopende watervoerende buizen die aan de uiteinden aan verzamelbuizen zijn gelast (figuur 4.10). Het geheel wordt afgedekt met in folie gesealde isolatiedekens. Bij een tweede type liggen in spiraalvorm gebogen metalen buizen (figuur 4.11) of matten van kunststofbuisjes los op standaard metalen plafondplaten. Bij een derde type zijn de spiralen of matten in de fabriek aan de platen gehecht of in een sandwichpaneel opgenomen. De platen of sandwichpanelen worden aan frames bevestigd. Registers, spiralen en matten sluit men met gepantserde slangen aan op verwarmingsleidingen die boven het plafond liggen. De inbouwhoogte van verwarmingsplafonds is, inclusief aansluitleidingen, 100 tot 150 mm.

Een vierde type verwarmingsplafond bestaat uit buigbare matten van kunststofbuisjes die met een stuclaag worden afgewerkt en daardoor als gebogen vlak zijn uit te voeren (figuur 4.12). Omdat de ruimte boven het plafond ontoegankelijk is moeten verbindingen, afsluiters, aansluitleidingen e.d. in een koef, gang of andere plaats zijn aangebracht waar ze bereikbaar zijn voor controle en onderhoud.

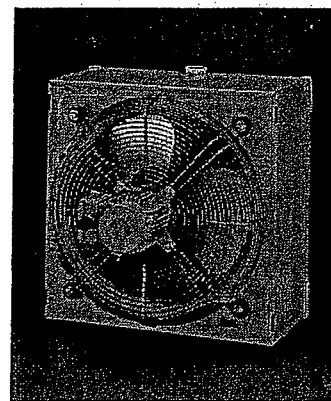
Omdat plafondverwarming een beperkt vermogen heeft en de warmte voor een groot deel niet wordt toegevoerd op plaatsen waar het grootste warmteverlies optreedt is het meestal niet geschikt als hoofdverwarming. Het beperkte vermogen hangt samen met de maximaal toelaatbare plafondtemperatuur die weer afhankelijk is van de afstand tussen het plafond en het hoofd van de mensen in de ruimte. Bevindt het plafond zich op een hoogte van 2,7 m in een ruimte waarin mensen hoofdzakelijk zitten dan is het verwarmingsvermogen maximaal 70 W/m² en in ruimten waarin veel wordt gestaan maximaal 50 W/m². De hier beschreven verwarmingsplafonds zijn eveneens te gebruiken als koelplafond (zie paragraaf 4.4.3.2).



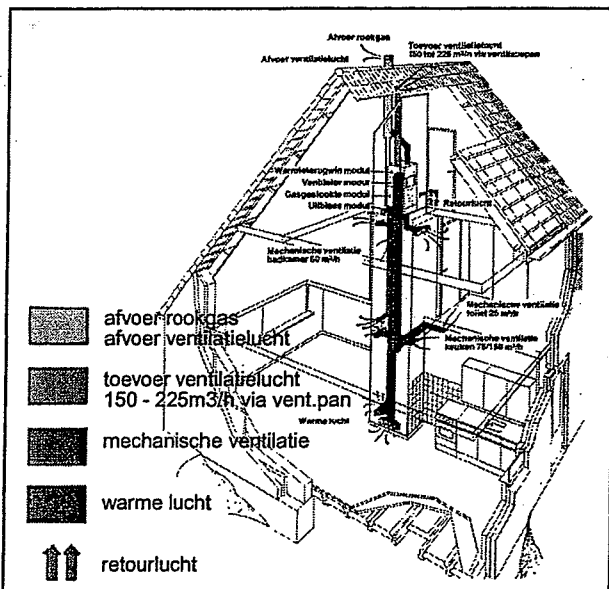
Toepassing van stralingspanelen in een winkel en in het National Space Centre te Leicester - Figuur 4.13



Direct gestookte luchtverwarmer - Figuur 4.14



Indirect gestookte luchtverwarmer - Figuur 4.15



Centrale luchtverwarming voor woningen - Figuur 4.16

Voor plafondverwarming zijn ook stralingspanelen te gebruiken. Dit zijn stevige stalen platen die aan buizen zijn gelast (figuur 4.13) en op paneelradiatoren lijken. Ze worden vaak in het vlak van het plafond of net onder het plafond aangebracht. Stralingspanelen hebben een hogere temperatuur dan de hiervoor besproken verwarmingsplafonds en hebben een vermogen van maximaal 700 W/m^2 . Door hun hoge temperatuur zijn ze alleen geschikt voor hoge ruimten ($>5\text{m}$). Omdat stralingspanelen veel steviger zijn dan verwarmingsplafonds beschadigen ze minder snel en worden ze om die reden vaak toegepast in sportzalen, montagehallen en dergelijke.

4.2.4 Luchtverwarming

Bij **centrale** luchtverwarming wordt lucht op een centrale plaats in het gebouw verwarmd, bij **decentrale** luchtverwarming gebeurt dit in de te verwarmen ruimten zelf. Voor decentrale luchtverwarming bestaan er "**direct**" of "**indirect**" gestookte toestellen. Een direct gestookte luchtverwarmer is een verbrandingstoestel dat is samengebouwd met een ventilator (figuur 4.14). De ventilator zorgt voor de luchtstroming door het toestel en voor de verspreiding van de lucht in de te verwarmen ruimte. Moderne direct gestookte luchtverwarmers zijn - net als moderne verwarmingsketels - gesloten verbrandingstoestellen met ventilatorbranders die hun verbrandingslucht via een apart kanaal van buiten aanzuigen. Een indirect gestookte luchtverwarmer is een warmtewisselaar die met een ventilator is samengebouwd. De warmtewisselaar wordt gevoed met centraal verwarmd water (figuur 4.15).

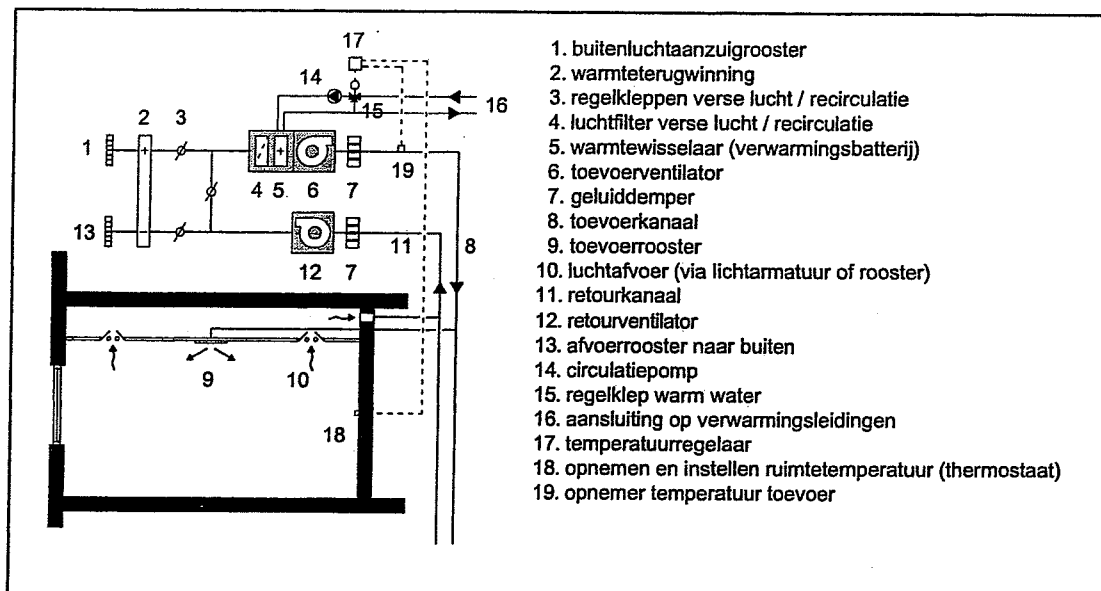
Centrale luchtverwarming voor **woningen** bestaat meestal uit een gasgestookt verbrandingstoestel dat met een ventilator, luchtfilter en warmtewisselaar tot één apparaat is samengebouwd. Met het apparaat wordt van buiten aangezogen lucht gefilterd, verwarmd en - via luchtkanalen - naar de te verwarmen ruimten gevoerd (zie schema figuur 4.16). Afgekoelde lucht stroomt via inpandige ruimten en retourkanalen terug naar het apparaat. De warmtewisselaar zorgt ervoor dat de warmte uit de afvoerlucht aan de van buiten aangezogen lucht wordt overgedragen. Kenmerkend voor dit systeem is dat het zowel voor verwarming als voor luchtverversing dient. Dit wordt vaak als voordeel genoemd.

Voor luchtverwarming van **industriële** gebouwen gebruikt men vaak decentrale luchtverwarming met direct met aardgas, butaan of propaan gestookte luchtverwarmers, zie paragraaf 4.2.2. Voor de aanvoer van het gas is een leidingnet nodig. Is centrale verwarming aanwezig of bestaat het gebouw uit meer verdiepingen dan is het gebruikelijker om indirect gestookte luchtverwarmers toe te passen of centrale luchtverwarming.

Bij kleinere **kantoren** met **centrale** luchtverwarming worden - net als bij woningen - vaak direct gestookte toestellen gebruikt. Bij grotere kantoren ($>2000 \text{ m}^3$) past men meestal centraal opgestelde luchtbehandelingskasten toe die - in hun eenvoudigste vorm - bestaan uit een luchtfilter, warmtewisselaar en ventilator. De lucht wordt met kanalen naar de te verwarmen ruimten gevoerd en via retourkanalen weer teruggevoerd (recirculatie). Deze voorziening is uit te breiden met een tweede ventilator en een wisselsectie die de luchtverversing regelt door een gedeelte van de retourlucht naar buiten af te voeren en te vervangen door een zelfde hoeveelheid verse buitenlucht. Een tweede uitbreiding, die door de huidige energieprestatie-eisen niet meer is weg te denken, is warmteterugwinning (zie schema figuur 4.17).

Bij luchtverwarming gelden dezelfde op het comfort gerichte aanwijzingen als bij convectieverwarming. Zo is voor verblijfsruimten aan te bevelen om bij een meer dan 30% transparante gevel HR-glas of klimaatramen of -gevels toe te passen en aandacht te besteden aan het voorkomen van koudeval bij koude wanden [38]. Zie ook de aanwijzingen in paragraaf 4.2.3.6.

Voor luchtverwarming geldt als vuistregel dat bij toevoer vanuit de vloer de luchttemperatuur maximaal $60 \text{ }^\circ\text{C}$ mag zijn ($\Delta\theta$ ca. $40 \text{ }^\circ\text{C}$) mits de luchtstroom niet op personen is gericht. Bij toevoer vanuit het plafond mag de lucht niet warmer zijn dan $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta\theta$ ca. $20 \text{ }^\circ\text{C}$) om het ontstaan van een warme luchtdeken onder het plafond te voorkomen. Bij hogere ruimten ($>4 \text{ m}$) en toevoer vanuit het plafond is een hogere toevoertemperatuur dan $40 \text{ }^\circ\text{C}$ mogelijk als de lucht met een hoge snelheid, bijvoorbeeld via wervelroosters (zie paragraaf 4.5.4.3), naar beneden gericht wordt ingeblazen.



Schema luchtverwarming in kantoren - Figuur 4.17

4.3 Luchtverversing

4.3.1 **Natuurlijk of mechanisch?**

Luchtverversing is mogelijk met natuurlijke of mechanische middelen of met een combinatie van beide. Het eenvoudigst is natuurlijke toe- en afvoer via te openen ramen. Natuurlijke afvoer kan ook via bouwkundige schachten of luchtkanalen plaatsvinden. In dat geval ontstaat een betere doorstroming van de ruimte dan bij afvoer via ramen en is het mogelijk om in pandige ruimten mee te ventileren. Natuurlijke en mechanische ventilatie zijn te combineren, bijvoorbeeld natuurlijke toevoer via ramen of roosters in de gevel en mechanische afvoer via een afvoerkanaal met daarin een ventilator. Vanzelfsprekend zijn ruimten ook uitsluitend mechanisch te ventileren door luchttoevoer en luchtafvoer beide via kanalen en ventilatoren te laten plaatsvinden.

Woonvertrekken, slaapkamers e.d. worden vrijwel zonder uitzondering van te openen ramen voorzien. Verse lucht komt via kleine klepramen of gevelroosters binnen en verontreinigde lucht wordt via keuken, toilet, badruimte en andere in pandige ruimten mechanisch afgevoerd. In toenemende mate worden woningen geheel mechanisch geventileerd om warmte uit de afvoerlucht te kunnen gebruiken voor verwarming van de toevoerlucht. We noemen dit "gebalanceerde ventilatie". Te openen ramen worden dan alleen nog gebruikt voor extra ventilatie, bijvoorbeeld voor koeling in de zomer.

Er is een periode geweest dat te openen ramen voor utiliteitsgebouwen overbodig werden gevonden als die gebouwen mechanisch werden geventileerd. Onderzoek naar het "Sick Building Syndrome" heeft aangetoond dat in gebouwen met gesloten gevels gemiddeld meer hinder en gezondheidsklachten voorkomen dan in gebouwen met te openen ramen [9] (zie ook paragraaf 2.6). Daarom krijgen verblijfsruimten in utiliteitsgebouwen tegenwoordig meestal te openen ramen. Het is niet altijd mogelijk om deze ramen voor luchtverversing te gebruiken, bijvoorbeeld door lawaai of stank van verkeer of industrie. Ook kan het ventilatiebereik van te openen ramen te beperkt zijn, zoals bij diepe vertrekken. In die gevallen is mechanische ventilatie nodig.

4.3.2 **Natuurlijke luchtverversing**

De lucht in verblijfsruimten is via te openen ramen te verversen als:

- het ventilatievoud*) voor luchtverversing niet meer is dan 2 (anders ontstaan tochtklachten bij buitentemperaturen lager dan 12°C),
- de van buiten komende lucht door een radiator, convector of luchtstroom tot ten minste 18°C wordt verwarmd,
- de ruimte niet dieper is dan 2 maal de hoogte van de ruimte,
- open ramen geen onaantvaardbare geluidsbelasting of verontreiniging van de ruimtelucht (door verkeer of industrie) tot gevolg heeft.

*) "Ventilatievoud" is een aanduiding voor de mate waarin ruimten worden geventileerd. "Ventilatie-frequentie" en "luchtwisselingen per uur" betekenen hetzelfde. De dimensie is: m^3 lucht per uur per m^3 ruimte ($m^3/h.m^3 = h^{-1}$). "Circulatievoud" wordt wel gebruikt om aan te geven dat de lucht waarmee wordt geventileerd (voor een deel) geen verse buitenlucht is. Dit boek maakt dit onderscheid niet omdat apart wordt vermeld als het om luchtverversing gaat.

4.3.3 **Luchtreiniging**

Buitenlucht bevat stofdeeltjes afkomstig van natuurlijke bronnen (zand, stuifmeelpollen e.d.) en kunstmatige bronnen (verkeer en industrie). Op het platteland is de lucht schoner dan in een stedelijke omgeving en in industriegebieden. In gebouwen bevinden zich verontreinigingsbronnen, waardoor de stofconcentratie binnen meestal hoger is dan buiten. Tabel 4.2 geeft een overzicht. Behoudens bij speciale stofarme ruimten, zoals operatiekamers en productieruimten voor micro-elektronische componenten, worden meestal geen eisen gesteld aan de luchtreinheid. Wel gelden er eisen voor luchtfilters en streeft men met een voorgeschreven filterklasse naar een bepaald niveau van luchtreinheid. Een veel gebruikte filterklasse-indeling is van EUROVENT, zie tabel 4.3. Voor kantoren wordt vaak EU7 gekozen, voor ziekenhuizen EU8 of EU9.

Tabel 4.2 Gemiddeld stofgehalte van lucht

plaats	mg/m ³
platteland	0,05 - 0,10
stedelijke omgeving	0,10 - 0,50
industriegebied	1 - 3
woonruimte	1 - 2
warenhuis	2 - 5
werkplaats	1 - 10

Tabel 4.3 Luchtfilterklassen

filtertype	rendement in %	EUROVENT indeling
groffilters (gewichtstest)	<65	EU1
	65-80	EU2
	80-90	EU3
	>90	EU4
fijnfilters (verkleuringstest)	40-60	EU5
	60-80	EU6
	80-90	EU7
	90-95	EU8
	>95	EU9

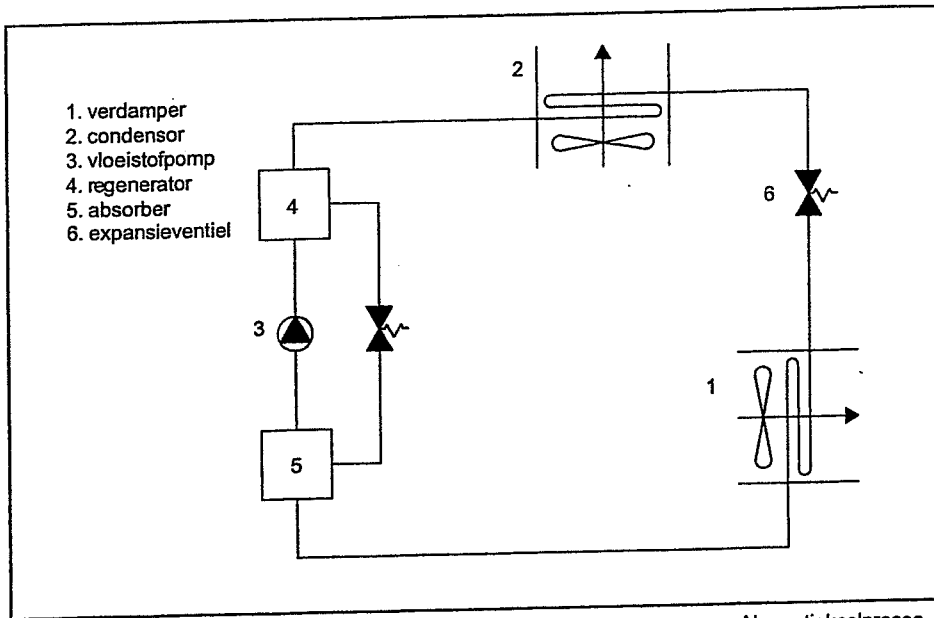
Luchtfiltering wordt vooral toegepast om vuilophoping (en daarmee de groei van micro-organismen) in klimaatinstallaties te voorkomen en de kosten van schoonmaakonderhoud te beperken. Slecht onderhouden en vervuilde installaties kunnen een bron van hinder en vooral gezondheidsklachten zijn [1][9]. Anders dan vaak wordt gedacht komen de meeste hinder en gezondheidsklachten van bronnen binnen het gebouw, waartegen filtering niet helpt. Ventilatie met buitenlucht, waardoor verontreinigingen worden verdund en naar buiten afgevoerd, heeft wel effect. De meest effectieve aanpak is het zoveel mogelijk voorkomen of elimineren van verontreinigingsbronnen. Gebruik daarom alleen bouw- en inrichtingsmaterialen waarvan bekend is dat ze geen hinderlijke of ongezonde stoffen of gassen in het binnenmilieu brengen. Werk ruimten zo af dat stof zich niet kan ophopen en zorg ervoor dat de ruimten eenvoudig zijn schoon te houden. Vermijd om die reden horizontale vlakken waarop stof kan blijven liggen en pas geen gordijnen en vloerbedekking toe die stof aantrekken.

4.4 Koeling

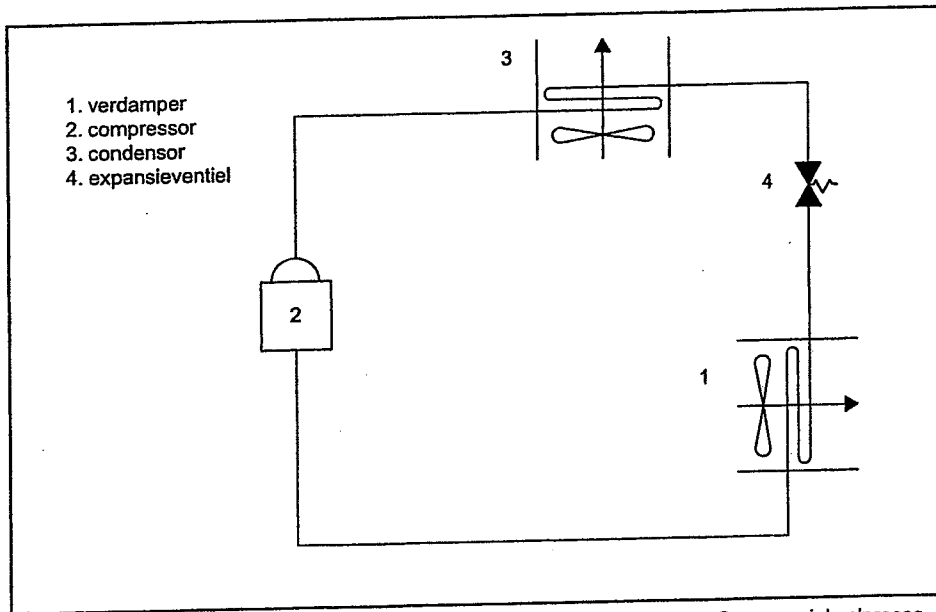
4.4.1 Natuurlijke koeling

Omdat de buitentemperatuur in Nederland gemiddeld 10 °C is [39] zijn gebouwen een groot deel van de tijd op natuurlijke wijze met buitenlucht te koelen. Paragraaf 4.3.2 geeft de beperkingen aan voor natuurlijke ventilatie van verblijfsruimten. Deze beperkingen gelden ook voor natuurlijke koeling.

Bij buitentemperaturen boven 18 °C zijn verblijfsruimten via te openen ramen op natuurlijke wijze 10-voudig te ventileren en dus ook op natuurlijke wijze te koelen. Als vuistregel voor verblijfsruimten geldt dat natuurlijke koeling kan volstaan als de binnentemperatuur niet meer dan 3°C hoger wordt dan de buitentemperatuur. Hieruit volgt dat verblijfsruimten natuurlijk zijn te koelen als hun koelbehoefte niet meer is dan **25 à 30 W/m²** vloeroppervlakte. Bij ruimten voor kortdurend verblijf, zoals sportzalen en verkeersruimten, zijn grotere ventilatievouden mogelijk en worden grotere temperatuurverschillen toegestaan zodat bij dergelijke ruimten met natuurlijke koeling aan grotere koelbehoeften is te voldoen. In paragraaf 8.3.6 wordt ingegaan op het dimensionering van ventilatieopeningen.



Absorptiekoelproces - Figuur 4.18



Compressiekoelproces - Figuur 4.19

4.4.2 Mechanische koeling

4.4.2.1 Noodzaak van toepassing

Als natuurlijke koeling via ramen onvoldoende effect heeft is mechanische ventilatie het eerste waaraan moet worden gedacht omdat hiermee beter gebruik is te maken van het warmteaccumulerende vermogen van gebouwen en ventilatie doelgerichter kan plaatsvinden. Mechanische ventilatie met ongekoelde buitenlucht kan voor ruimtekouling volstaan als de interne warmtebelasting beperkt is en effectief gebruik is te maken van de gebouwmassa voor *korte termijn* warmteopslag. De massa moet toegankelijk zijn door zo weinig mogelijk afscherming door verhoogde vloeren, lambriseringen, verlaagde plafonds e.d.

Bij *lange termijn* opslag wordt het warmteaccumulerende vermogen van de bodem gebruikt. Doordat de temperatuurverschillen tussen de seizoenen veel groter zijn dan tussen dag en nacht en het accumulerend vermogen van de bodem bovendien veel groter is dan die van een gebouw zijn met lange termijn warmteopslag zeer lichte en transparante gebouwen te realiseren zonder dat omvangrijke mechanische koeling nodig is terwijl aan strenge wettelijke energieprestatie-eisen is te voldoen.

Andere methoden die kunnen voorkomen dat omvangrijke mechanische koeling met koelmachines nodig is zijn adiabatische koeling en koeling met koeltorens. Beide systemen maken gebruik van het koelend effect van verdampend water. Ze hebben om die reden en omdat ze vaak minder energie vragen een "natuurlijk" imago. De werking van koeltorens wordt in paragraaf 4.4.2.4 toegelicht, de werking van adiabatische koeling in paragraaf 4.7.2 en 4.7.3. De volgende paragrafen beschrijven mechanische koeling met koelmachines.

4.4.2.2 Werkingsprincipes

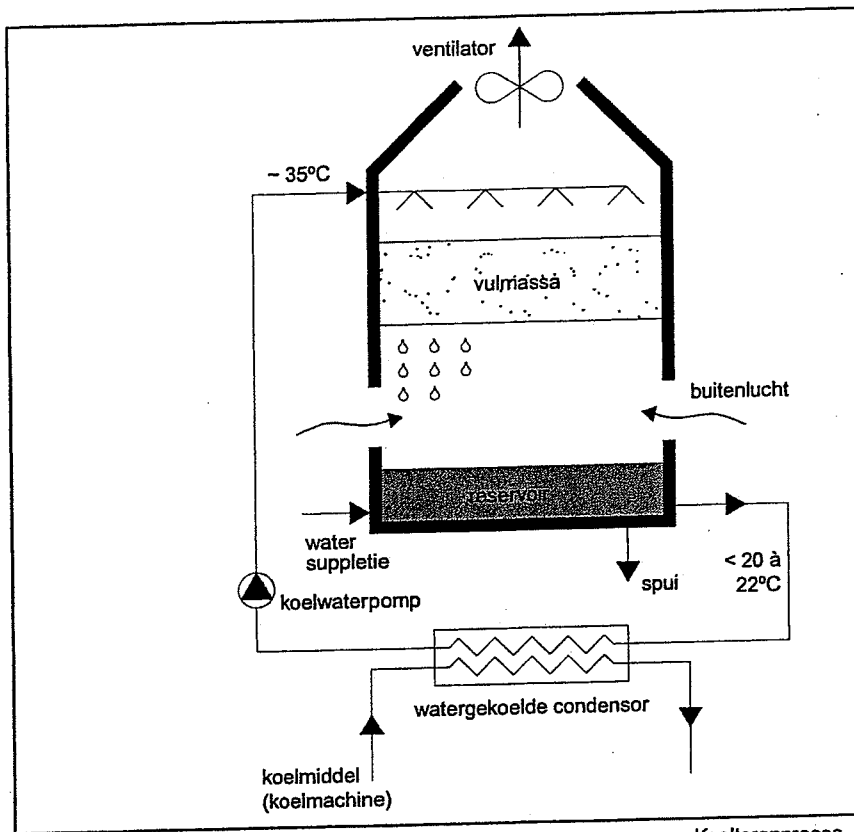
Met een koelmachine wordt warmte verplaatst van een laag naar een hoog temperaturniveau. Hiervoor bestaan verschillende systemen. Het *absorptie*-systeem maakt gebruik van het natuurkundige principe dat warmte vrijkomt bij absorptie en warmte wordt opgenomen bij resorptie van water in hygroscopisch zout. Dit principe, opgenomen in een werkend koelproces, is in figuur 4.18 schematisch weergegeven. Toepassing van het absorptie koelproces is aantrekkelijk als "gratis" warmte beschikbaar is, zoals zonnewarmte of afvalwarmte van elektriciteitscentrales.

Het *compressie*-systeem maakt gebruik van het principe dat bij verdamping van vloeistoffen warmte wordt opgenomen en bij condensatie van dampen warmte wordt afgegeven. Bij dit proces circuleert in een gesloten systeem een koelmiddel dat onder atmosferische druk dampvormig is en onder iets hogere druk vloeibaar. Figuur 4.19 geeft dit proces schematisch weer. De compressor zuigt het dampvormige koelmiddel aan, verhoogt de druk en perst het in de richting van de condensor. In de condensor geeft het middel warmte af en wordt vloeibaar. Na het expansieventiel is de druk lager en kan het koelmiddel in de verdamper, door onttrekking van warmte aan de - te koelen - omgeving, weer in dampvorm overgaan. Bij kleinere vermogens (tot 500 kW) past men bij dit koelproces meestal zuigercompressoren toe, bij grotere vermogens (vanaf 400 kW) centrifugaalcompressoren.

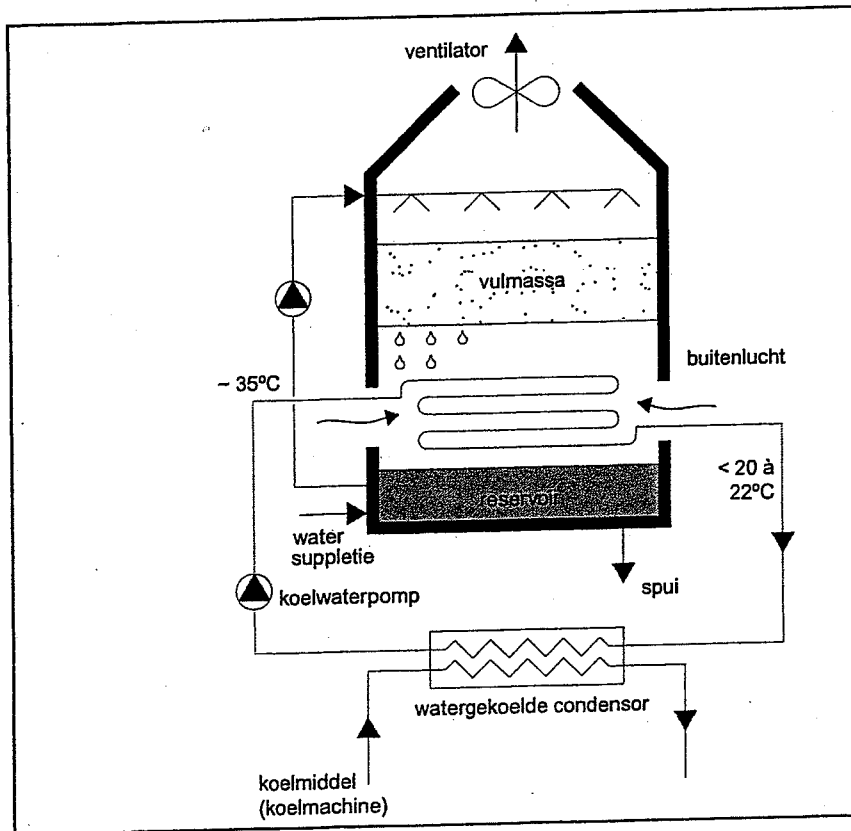
Bij het compressie-koelproces kan de verdamper zich in een te koelen luchtstroom bevinden. Dit wordt "directe expansie" genoemd en toegepast bij kleinere decentrale koelsystemen. Bij grotere systemen bevindt de verdamper zich in een waterstroom en produceert "gekoeld water" (6 °C). Dit water wordt via leidingen naar eindapparaten gevoerd en na warmteopname (tot 12 °C) naar de koelmachine teruggevoerd. Vaak mengt men bij de eindapparaten het gekoelde water met retourwater uit het apparaat. Dit wordt gedaan voor een betere regelbaarheid, een gelijkmatiger temperatuur in het eindapparaat of om condensatie tegen te gaan.

4.4.2.3 Condensors

In de condensor van een compressorkoelinstallatie wordt het gecomprimeerde dampvormige koelmiddel met lucht of water gekoeld. *Luchtgekoelde* condensors plaatst men buiten en bij voorkeur op het dak (zie paragraaf 7.3.3.1). De compressor en condensor zijn via koelmiddelleidingen gekoppeld. *Watergekoelde* condensors bouwt men met de compressor samen tot koelmachine.



Koeltorenproces - Figuur 4.20



Hybride koeltorenproces - Figuur 4.21

Als koelwater kan leidingwater, grondwater, oppervlaktewater of koeltorenwater dienen. Leidingwater is uit milieu-overwegingen ongewenst en bovendien kostbaar. Grondwater na gebruik lozen op de riolering of op het oppervlaktewater komt steeds minder voor omdat hiervoor nauwelijks nog vergunningen worden gegeven. In toenemende mate wordt bronwater na gebruik terug gepompt (zie paragraaf 3.5.6). Grote industriële installaties en elektriciteitscentrales gebruiken vaak oppervlaktewater. Bij utiliteitsgebouwen kan dit ook als het gebouw bij een rivier staat, maar het is niet populair vanwege de snel vervuulende condensators. Daarom zie je dat bij die gebouwen ook vaak koeltorens zijn toegepast.

4.4.2.4 Koeltorens

Het in watergekoelde condensators opgewarmde koelwater is te koelen door het boven in een koeltoren te sproeien. Tijdens het vallen van de druppels verdampen ze een beetje waardoor warmte aan de druppels wordt onttrokken. Onderin de koeltoren wordt het water opgevangen en naar de condensor teruggevoerd (figuur 4.20). Er zijn ook "hybride" koeltorens waarbij het koelwatercircuit waarin de condensor is opgenomen is gescheiden van het koeltorenwater (figuur 4.21). In koeltorens kan het water een temperatuur krijgen die de psychrometrische natte luchttemperatuur van de buitenlucht benadert. In Nederland is deze temperatuur meestal lager dan 20°C en zelden hoger dan 22°C. Daarom worden koeltorens ook wel in combinatie met koelplafonds gebruikt, dus zonder koelmachine. Bij koeltorens verdampt water en wordt water gespuid om te voorkomen dat in het koelwater te hoge concentraties kalk en zout ontstaan. Het koelwater wordt aangevuld met onthard leidingwater. Het totale watergebruik van koeltorens is maar een fractie van de hoeveelheid die wordt gebruikt bij toepassing van grond- of oppervlaktewater als koelwater.

4.4.3 Eindapparaten

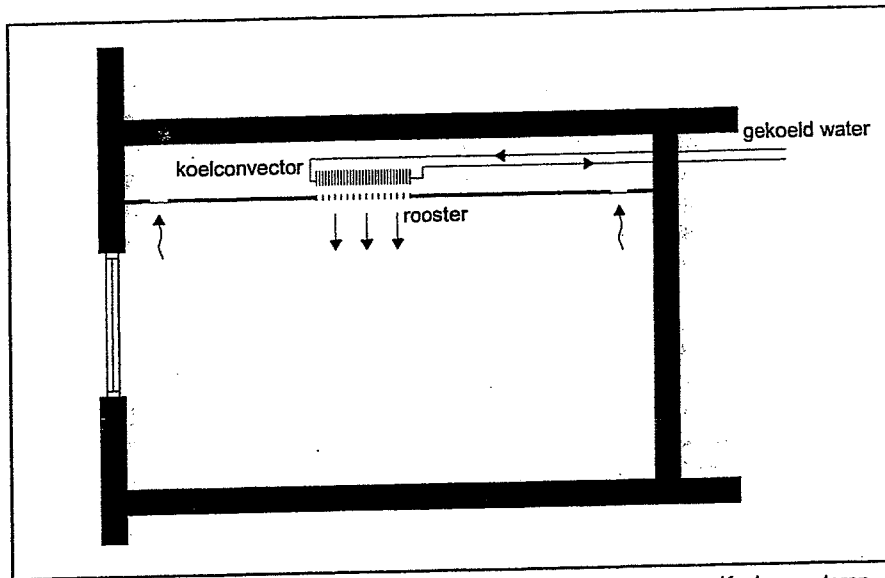
4.4.3.1 Algemeen

Bij mechanische koeling zijn de warmtewisselaars ("koelbatterijen") in luchtbehandelingskasten, inductieapparaten en ventilatorconvectoren de eindapparaten. Ook koelconvectoren, koelradiatoren, koelplafonds, koelvloeren e.d. zijn eindapparaten. Door de opkomst van de informatietechnologie, met z'n steeds krachtiger computers en randapparatuur, is de interne warmtebelasting van utiliteitsgebouwen sterk toegenomen. Mede daardoor zijn de laatste decennia eindapparaten ontwikkeld waarmee hoge koelvermogens zijn te realiseren. Vaak combineren deze apparaten de functies van verschillende eindapparaten, bijvoorbeeld een koelplafond dat plaatselijk is voorzien van koelribben waarlangs lucht wordt toegevoerd waardoor de convectieve warmteoverdracht van het plafond wordt versterkt. Technisch is veel mogelijk, maar niet alles wat mogelijk is, is wenselijk vanwege de bij-effecten zoals tocht. Voor verblijfsruimte van 2,7 m hoog is een specifiek koelvermogen van 100 W/m² vloeroppervlakte haalbaar. Zie paragraaf 5.5 voor de definitie van "specifiek vermogen" en de factoren die daarop invloed hebben.

4.4.3.2 Koelplafond / klimaatplafond

Koelplafonds worden net zo uitgevoerd als verwarmingsplafonds (zie paragraaf 4.2.3.9). Het enige verschil is dat, om condensatie te voorkomen, bij koelplafonds de aansluitleidingen zijn geïsoleerd met dampremmende isolatie. Het koelvermogen van het plafond wordt geregeld met een set bestaande uit een ruimtethermostaat, een regelklep in de toevoerleiding en een regelkastje. Een plafond voor zowel koeling als verwarming is een "4-pijps klimaatplafond".

Op een koelplafond ontstaat condensatie als de temperatuur van het oppervlak onder het dauwpunt van de lucht komt. Hierdoor is het koelvermogen van vlakke metalen plafonds meestal beperkt tot *ca.* 60 W/m². Door perforatie neemt het koelvermogen af. Buitenlucht bevat bij hoge temperaturen meer vocht dan lucht in mechanisch gekoelde ruimten, daardoor is het vermogen van koelplafonds in natuurlijk geventileerde ruimten niet meer dan *ca.* 30 W/m². In de buurt van open ramen en op plaatsen waar het plafond de laagste temperatuur heeft (bij de aansluiting op de toevoerleiding) is de kans op condensatie en daardoor een druppelend plafond het grootst. Overigens is het wel een beetje vreemd om bij hoge buitentemperaturen de ramen open te zetten als met het plafond wordt gekoeld omdat natuurlijke ventilatie tot een grotere warmtebelasting kan leiden dan het plafond aan koelvermogen kan leveren. Om die reden voorziet men ramen van ruimten met koelplafonds vaak van contacten die ervoor zorgen dat het koelplafond bij geopende ramen wordt uitgeschakeld.



Koelconvectoren - Figuur 4.22

Voor vrij hangende of geprofileerde plafonds vermelden sommige leveranciers koelvermogens tot 2 maal zo hoge waarden als in dit boek [40]. Het genoemde koelvermogen van 60 en 30 W/m² heeft betrekking op vlakke gelakte metalen plafonds met een geringe perforatiegraad. Lak heeft een emissiecoëfficiënt voor straling van 0,92, dat wil zeggen dat 92% van de straling wordt uitgewisseld die een zwart oppervlak met de omgeving zou wisselen. Tabel 4.4 geeft een overzicht van de emissiecoëfficiënten van verschillende materialen en afwerkingen, de totale warmte-uitwisseling is vermeld als deel van de totale warmte-uitwisseling van gelakte plafonds. Hierbij is voor lak uitgegaan van een warmteoverdrachtsfactor voor convectie $\alpha_c = 3,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ en voor straling $\alpha_r = 5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Tabel 4.4 Emissiecoëfficiënt voor straling van verschillende materialen

materiaal	emissiecoëfficiënt	totale warmte-uitwisseling ¹⁾
staal		
- onbewerkt	0,80	0,92
- verzinkt nieuw	0,08	0,43
- verzinkt verweerd	0,26	0,55
- gelakt/gemoffeld	0,92	1,00
aluminium		
- onbewerkt	0,07	0,42
- gepolijst	0,05	0,41
- geanodiseerd, glanzend	0,10	0,44
- „ „ , mat	0,60	0,78
verf		
- aluminiumverf	0,35	0,61
- moffellak	0,92	1,00
stuc, gips, marmer, beton	0,94	1,01

¹⁾ ten opzichte van moffellak

Voorbeeld Een verzinkt stalen plafond heeft een koelvermogen van: $0,43 \times 60 = 25,8 \text{ W}/\text{m}^2$. Na verwerking neemt het vermogen toe tot: $0,55 \times 60 = 33 \text{ W}/\text{m}^2$. Een verzinkt stalen plafond in een ruimte met te openen ramen heeft een half zo groot koelvermogen, namelijk 12,9 tot 16,5 W/m².

4.4.3.3 Koelconvectoren

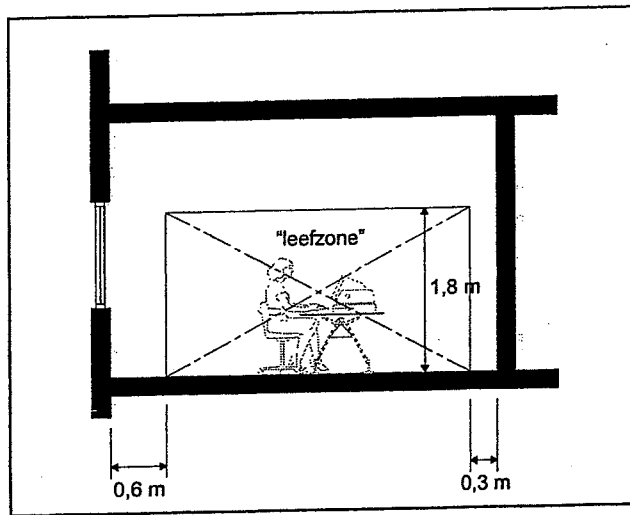
Koelconvectoren zijn - net als verwarmingsconvectoren - buizen waarvan de uitwendige oppervlakte met lamellen is vergroot. Ze worden gevoed met gekoeld water waarvan, om condensatie te voorkomen, de temperatuur net boven het dauwpunt van de ruimte ligt (>18 °C). Door convectie stroomt lucht van boven naar beneden langs de convector. Koelconvectoren plaats je daarom hoog in de ruimte, eventueel boven een verlaagd plafond met daarin een rooster waardoorheen de koele lucht naar de ruimte kan stromen. Via een ander rooster of via vrijgehouden randen ("eilandplafond") stroomt lucht terug naar de plafondruimte, zie figuur 4.22. Bij de situering van koelconvectoren moet je rekening houden met de inrichting van de ruimte om te voorkomen dat personen in de koude luchtstroom onder een convector komen te zitten. Is dit niet te vermijden dan moet een minder lage watertemperatuur worden toegepast (>21 °C).

4.4.3.4 Koelradiatoren

Elke radiator is voor koeling te gebruiken. Figuur 1.5 laat zien hoe in een Japanse kliniek designradiatoren werden toegepast voor koeling en tevens voor separatie van behandelruimten. Het koelvermogen van radiatoren is per m² iets groter dan van koelplafonds maar beduidend lager dan het verwarmingsvermogen, namelijk ongeveer 10 % van de in tabel 4.1 aangegeven waarden.

4.4.3.5 Koelvloeren

Met vloerverwarming, bestaande uit metalen of kunststofbuizen die in de deklaag van de vloer zijn opgenomen (zie blz. 28), kan ook worden gekoeld. Ter voorkoming van klachten over koude voeten is het praktisch haalbare koelvermogen van vloeren maximaal ca. 20 W/m².



Leefzone in een kantoor - Figuur 4. 23

4.4.4 Toevoertemperatuur bij luchtkoeling

Bij luchtkoeling is de kans op tocht te beperken door het temperatuurverschil tussen de luchttoevoer en de ruimte niet te groot te nemen. Het maximaal mogelijke verschil is afhankelijk van de hoogte van de ruimte, de wijze van toevoer en de plaats van het toevoerpunt. Als geen eisen worden gesteld aan de luchtvochtigheid en in de ruimte weinig vochtontwikkeling plaatsvindt kan tabel 4.5 worden aangehouden. Deze tabel geldt voor verblijfsruimten met het luchttoevoerpunt buiten de "leefzone".

NB Leefzone is de ruimte tussen de vloer en 1,8 m boven de vloer. Een strook van 0,3 m langs binnenwanden en 0,6 m langs buitenwanden valt buiten deze zone (zie figuur 4.23). Een buitenwand zonder ramen is als binnenwand te beschouwen.

Wordt een geringe temperatuurgradiënt nagestreefd, zoals in expositieruimten voor schilderijen, fabricageruimten voor temperatuurgevoelige meetinstrumenten, dan is het beter om geen groter temperatuurverschil toe te passen dan 8 °C. Bij lage toevoer, zoals bij kwelventilatie en verdringingsventilatie, is het aan te bevelen om het verschil te beperken tot maximaal 4 °C.

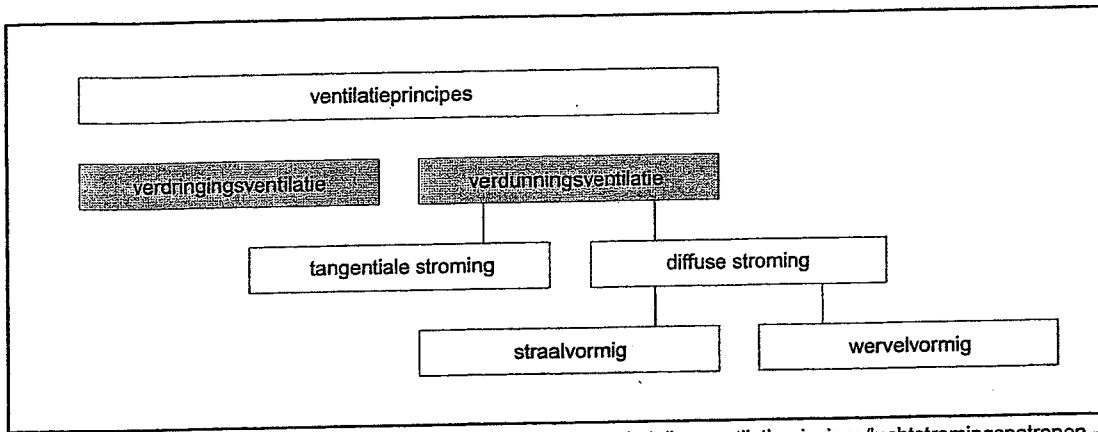
Tabel 4.5 Maximaal temperatuurverschil bij toevoer van gekoelde lucht

hoogte van de ruimte m	$\Delta\theta$ °C
2,4	6
2,7	8
3,0	10
3,5	12
4,0	15

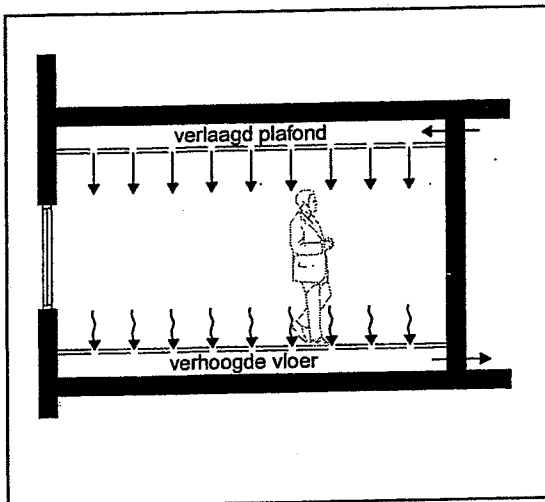
Koele lucht kan minder water bevatten dan warme lucht. Hierdoor wordt de absolute luchtvochtigheid in luchtgekoelde ruimten vaak laag, vooral als de lucht met een groot temperatuurverschil wordt toegevoerd. De luchtvochtigheid wordt minder laag als vochtontwikkeling in de ruimte plaatsvindt. In dat geval kan condensatie op toevoerroosters en oppervlakken in de directe omgeving van die roosters ontstaan. Veel installatieontwerpers beschouwen daarom 10 °C als het maximale temperatuurverschil waarmee gekoelde lucht kan worden toegevoerd. Als een bepaalde relatieve vochtigheid in de ruimte ontstaat of wordt nagestreefd is het maximaal mogelijke temperatuurverschil daarvan afhankelijk en gelden de waarden uit tabel 4.6.

Tabel 4.6 Maximaal temperatuurverschil bij toevoer van gekoelde lucht afhankelijk van relatieve vochtigheid

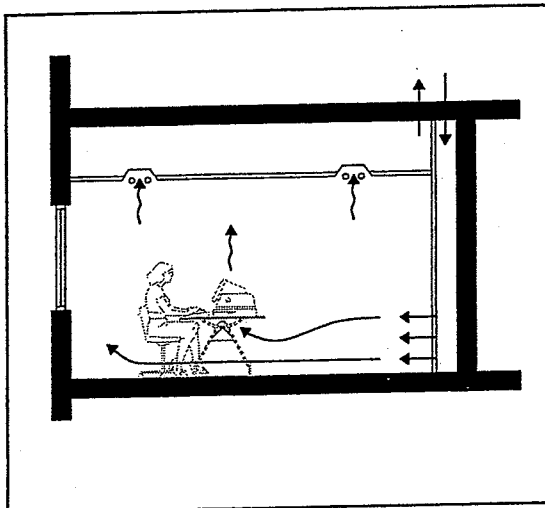
RV %	$\Delta\theta$ °C
30	18
40	14
50	11
60	8
70	5



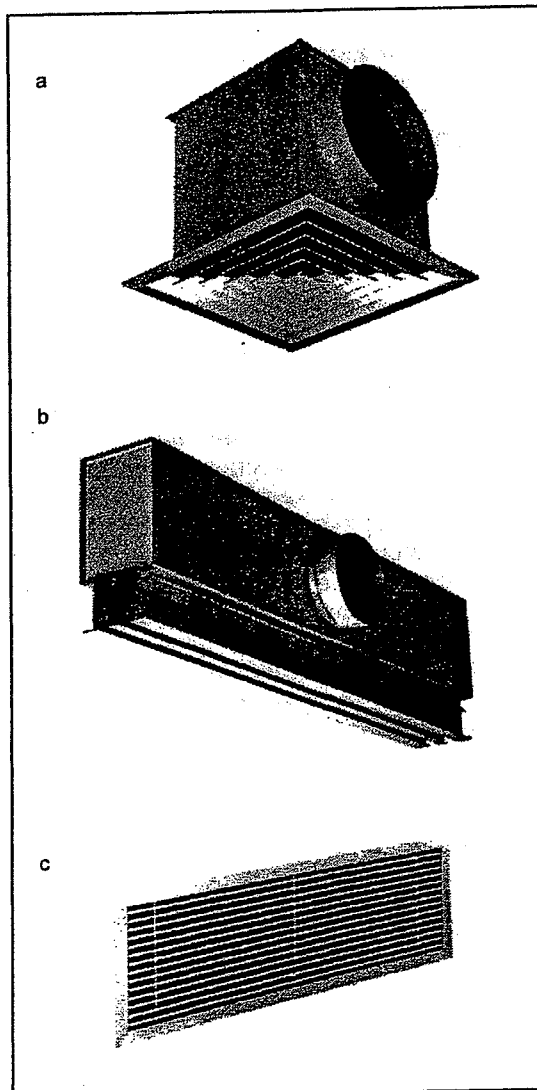
Indeling ventilatieprincipes/luchtstromingspatronen - Figuur 4.24



Verdringingsventilatie (zuivere vorm) - Figuur 4.25



Kwelventilatie - Figuur 4.26



a. Plafonduitlaat (anemostaat), b. lijnrooster en c. schoepenrooster - Figuur 4.27

4.5 Mechanische ventilatie

4.5.1 **Voorkomen van tocht**

Door ventilatie kan tocht ontstaan. De kans daarop is te beperken door de toevoertemperatuur niet te laag te kiezen (zie vorige paragraaf) en de lucht op de juiste plaats en met het juiste rooster toe- en af te voeren.

4.5.2 **Luchtstromingspatronen**

Bij mechanische ventilatie zijn verschillende luchtstromingspatronen te onderscheiden. Het belangrijkste verschil bestaat tussen **verdringings**-ventilatie en **verdunnings**-ventilatie. Bij verdringingsventilatie is verder onderscheid mogelijk tussen de **zuivere** en **onzuivere** verdringing. **Kwel**-ventilatie is een vorm van onzuivere verdringing. Bij verdunningsventilatie is het stromingspatroon **tangentiaal** of **diffuus**, terwijl diffuse luchtstroming **straal**-vormig of **wervel**-vormig kan zijn (zie figuur 4.24). Elk stromingspatroon en elke stromingsvorm heeft specifieke toepassingen. De toepassingsmogelijkheden zijn afhankelijk van de thermische belasting en van de afmetingen en functie van de ruimte.

4.5.3 **Verdringingsventilatie**

4.5.3.1 *Zuivere verdringing ("laminar flow")*

Bij verdringingsventilatie wordt lucht met een lage snelheid ($<0,2$ m/s) zo toegevoerd dat de lucht in de ruimte wordt weggeduwd zonder dat noemenswaardige menging plaatsvindt. Door deze laminaire stroming kunnen in de ruimte grote temperatuur- en concentratieverschillen ontstaan. Dit verschijnsel is nuttig te gebruiken als de ruimte hoog is en warme vervuilde lucht zich boven in de ruimte kan verzamelen. Door lucht hoog af te voeren blijven de temperatuurverschillen binnen de leefzone gering. De meest zuivere vorm van verdringingsventilatie ontstaat als lucht gelijkmatig verdeeld via een geperforeerd plafond wordt toegevoerd en via een geperforeerde vloer wordt afgevoerd (figuur 4.25). De lucht beweegt zich daarbij als een zuiger in een cilinder door de ruimte ("piston flow"). Met zuivere verdringing zijn ventilatievouden van 250 en meer haalbaar, zonder dat tocht ontstaat. Ook zijn er zeer hoge koelvermogens mee te realiseren (800 W/m² bij een ruimtehoogte van 3,5 m). Verdringingsventilatie wordt vaak toegepast in thermisch zwaar belaste ruimten, zoals computerzalen, of als extreem hoge eisen aan de luchtreinheid worden gesteld, zoals bij fabricage van micro-elektronische componenten en operatiekamers in ziekenhuizen.

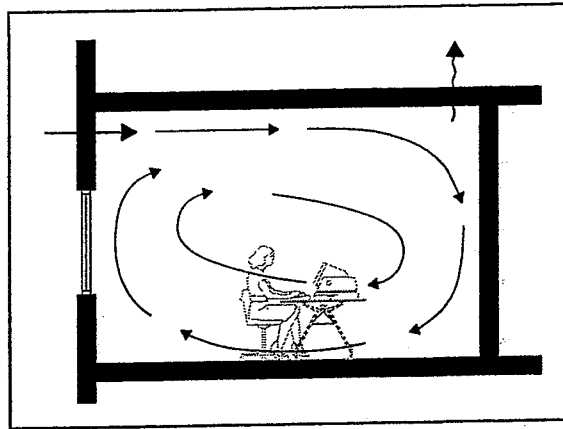
4.5.3.2 *Onzuivere verdringing (kwelventilatie e.d.)*

Bij onzuivere verdringing vindt luchttoevoer en -afvoer minder verspreid plaats dan bij zuivere verdringing. Een veel toegepaste vorm is kwelventilatie ("quelluftung"). Hierbij stroomt koele lucht vanuit grote roosters - met een geperforeerd oppervlak - turbulentarm en met een lage snelheid de ruimte in waarna de lucht zich onder invloed van de zwaartekracht horizontaal over de vloer verspreidt (figuur 4.26). Bij warmtebronnen (personen, apparatuur e.d.) ontstaat een stroming richting plafond, waar de lucht wordt afgevoerd [41]. In de buurt van roosters kunnen tochtklachten ontstaan. Ook kan bij dit systeem de temperatuurgradiënt in de ruimte minder comfortabel zijn (koude voeten en een warm hoofd). Bij verblijfsruimten met een hoogte van 2,7 m is het koelvermogen ca. 30 W/m² vloeroppervlakte, uitgaande van 8-voudige ventilatie en een temperatuurverschil tussen toevoer en afvoer van 4 °C. In combinatie met een koelplafond is 80 W/m² haalbaar [42]. Bij ruimten voor kort verblijf (kantines e.d.) of waarin mensen in beweging zijn (verkeersruimten, sportzalen e.d.) is een hoger koelvermogen te realiseren. Voor turbulentarme luchttoevoer zijn ook slangen van textiel te gebruiken, deze worden meestal hoog in de ruimte aangebracht. Ten slotte kan hier op de wijze van luchttoevoer bij theaters e.d. worden gewezen als een vorm van onzuivere verdringing (zie paragraaf 6.6.9).

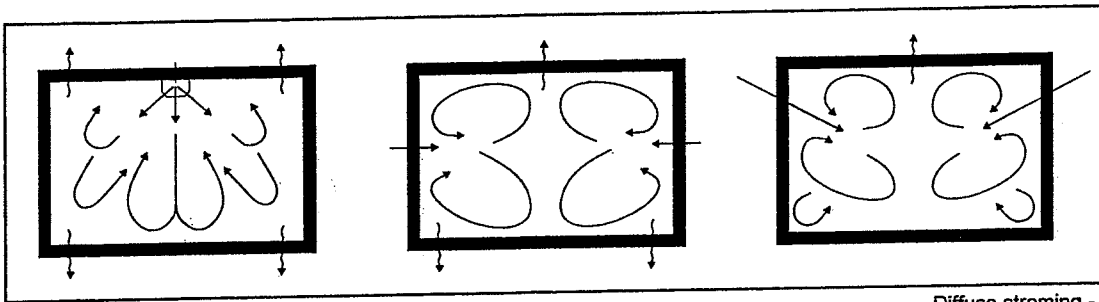
4.5.4 **Verdunningsventilatie**

4.5.4.1 *Algemeen*

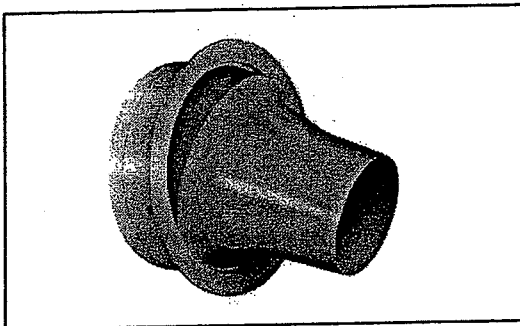
Bij verdunningsventilatie - de meest toegepaste ventilatievorm - wordt lucht met een relatief hoge snelheid ($>2,0$ m/s) toegevoerd. De turbulente toevoerstroam brengt de ruimtelucht in beweging en mengt zich daarmee waardoor relatief geringe temperatuur- en concentratieverschillen ontstaan. Voor verblijfsruimten geldt bij dit type ventilatie als vuistregel dat het ventilatievoud tussen 2 en 10 moet liggen. Minder dan 2-voudige ventilatie geeft onvoldoende menging waardoor dode hoeken en temperatuurverschillen in de ruimte ontstaan. Meer dan 10-voudige ventilatie kan tot tocht leiden. Bij ruimten voor kort verblijf of waarin mensen meer in beweging zijn, zoals verkeers-



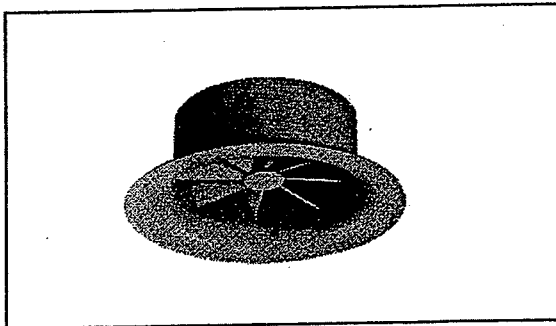
Tangentiale stroming met walsvormige luchtwervels - Figuur 4.28



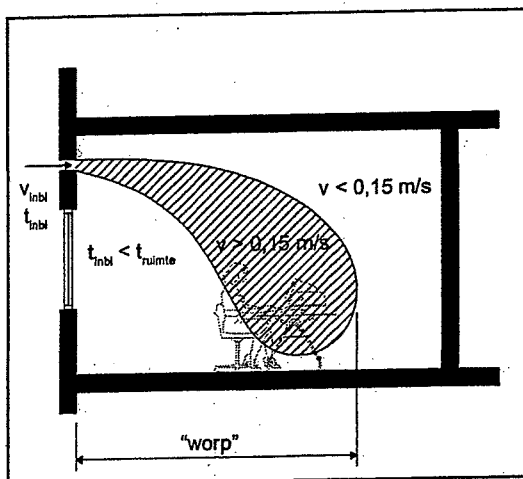
Diffuse stroming - Figuur 4.29



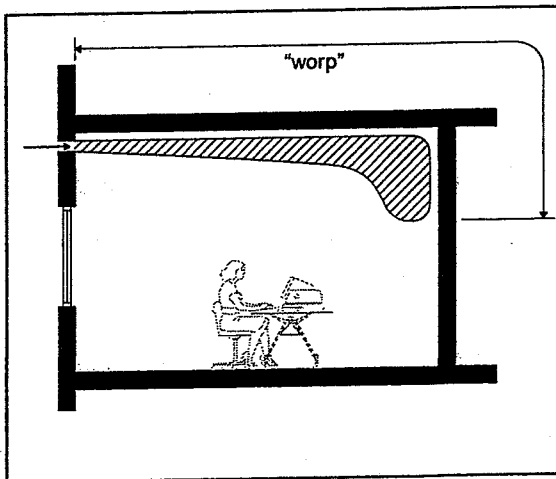
Nozzle - Figuur 4.30



Wervelrooster - Figuur 4.31



Inblaas koele lucht, worp - Figuur 4.32



Coanda-effect - Figuur 4.33

ruimten en sportzalen, is het mogelijk om hogere ventilatievouden toe te passen, zie onder andere tabel 6.3.

4.5.4.2 *Tangentiale stroming*

Bij deze vorm van verdunningsventilatie past men schoepenroosters, lijnroosters of plafonduitlaten toe (zie figuur 4.27). De toevoersnelheid is gemiddeld 2,5 m/s. Door de wijze van toevoer ontstaan walsvormige wervels met de hoogste luchtsnelheden langs plafond en wanden (zie figuur 4.28) en een lage snelheid ($<0,15$ m/s) in de leefzone. Om de lucht langs het plafond en de wanden te laten stromen wordt gebruik gemaakt van het "Coanda-effect". Dit effect beïnvloedt tevens de "worp" van het toevoerrooster. In paragraaf 4.5.4.5 en 4.5.4.6 worden deze begrippen toegelicht.

4.5.4.3 *Diffuse stroming*

Bij diffuse stroming is de luchttoevoerstroam op de ruimte gericht, zonder gebruik van het "Coanda-effect" (figuur 4.29). Voor voldoende luchtmenging en doorstroming van de ruimte past men bij hoge ruimten vaak "nozzles" toe (figuur 4.30). Dit zijn straalpijpvormige ornamenten waarmee lucht met een snelheid van 4 - 10 m/s wordt toegevoerd en een worp van 5 - 30 m wordt bereikt. Bij minder hoge ruimten past men dikwijls "wervelroosters" toe (figuur 4.31). Deze roosters geven de lucht in aanvang een axiale bewegingscomponent waardoor sneller menging ontstaat. Wervelroosters hebben een toevoersnelheid van 1,5 - 2,5 m/s en een worp van 2,5 - 5 m.

4.5.4.4 *Plaats luchttoevoer en -afvoer*

Om hinderlijke tocht te voorkomen moet bij tangentiële en diffuse stroming de lucht in het deel van de ruimte worden toegevoerd dat buiten de leefzone valt. De plaats van de afvoer is minder kritisch omdat de invloed op de luchtstroming gering is. Ter illustratie: een kaars op 0,5 m afstand uitblazen kan, zuigen op die afstand heeft geen effect. Wel heeft het hoog afvoeren van warme lucht en het laag afvoeren van koele lucht effect, namelijk beperking van de temperatuurgradiënt.

4.5.4.5 *Worp*

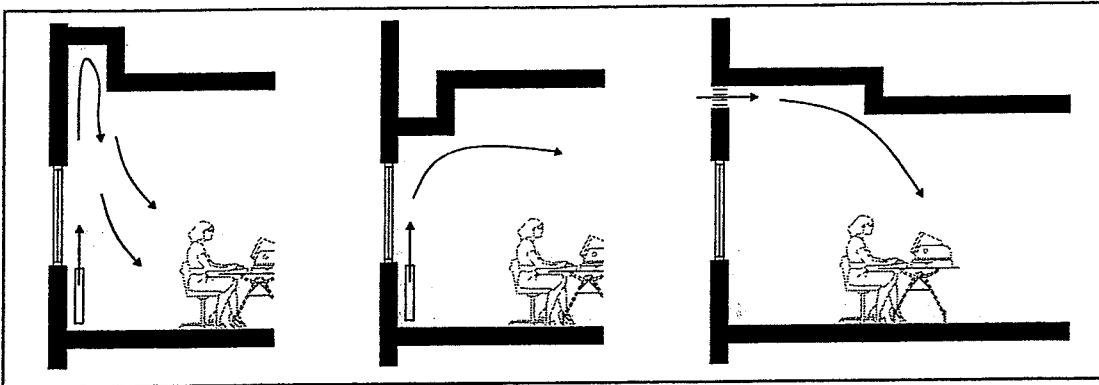
Een koude luchtstroom heeft door zijn gewicht de neiging om naar beneden af te buigen (figuur 4.32). Dit is niet bezwaarlijk als het toevoerpunt hoog zit en de "worp" ervoor zorgt dat de luchtstroom geen tocht in de leefzone veroorzaakt. Met "worp" wordt de afstand bedoeld tussen het toevoerpunt en het punt waar de snelheid van de luchtstroom is afgenomen tot de tochtgrens (ca. 0,15 m/s). Met "luchtstroom" wordt de toegevoerde lucht bedoeld, voor zover deze zich voortbeweegt met een snelheid van meer dan 0,15 m/s. De worp is een eigenschap van luchtroosters die door beproeving wordt vastgesteld. Leveranciers vermelden dit gegeven in hun documentatie.

4.5.4.6 *Coanda-effect*

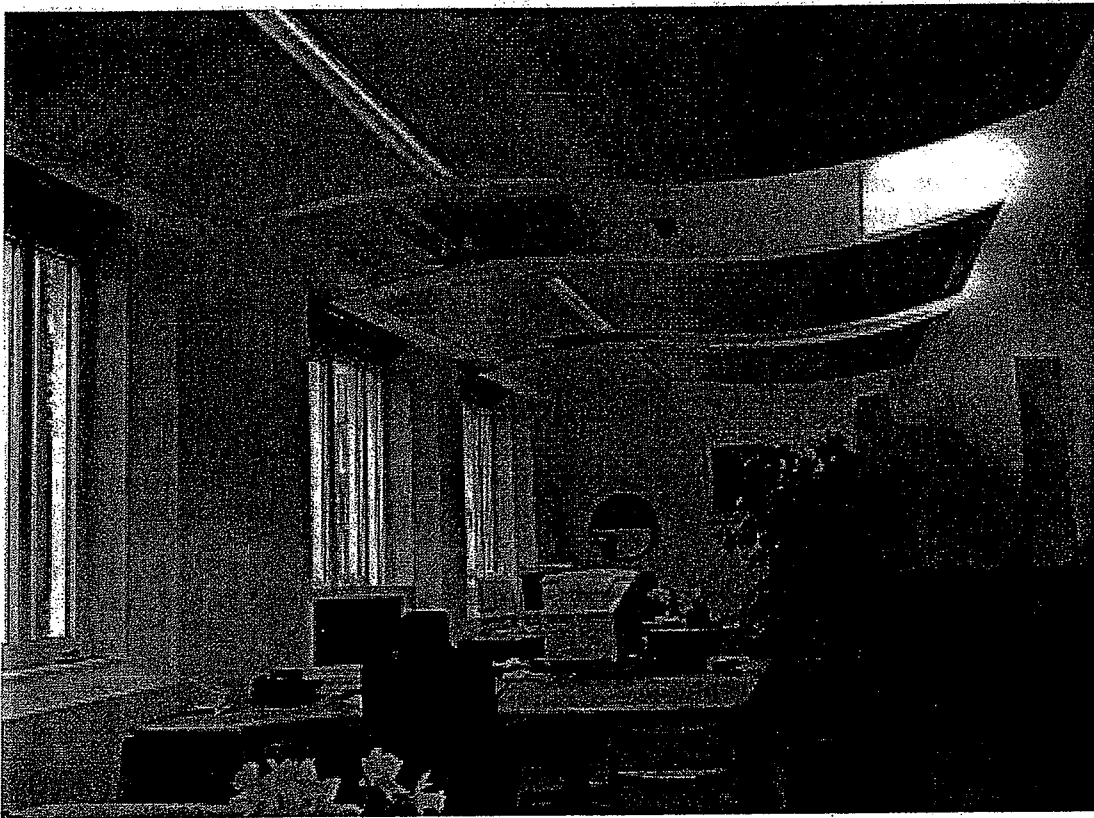
De worp van een rooster is te verlengen door de luchtstroom vlak langs en evenwijdig aan een wand of plafond toe te voeren (figuur 4.33). Door onderdruk blijft de lucht aan dat vlak kleven. Dit zogenaamde "Coanda-effect" kan bij tangentiële stroming ervoor zorgen dat de luchtstroom om de leefzone wordt heengeleid. Obstakels, zoals "opbouw"-verlichtingsarmaturen, balken en verspringen in het plafond, kunnen het effect verstoren en de luchtstroom doen afbuigen waardoor in de leefzone tocht ontstaat (figuur 4.34). De keuze van het juiste toevoerrooster op de juiste plaats is een vraagstuk voor gespecialiseerde installatieontwerpers. Ook kan proefkameronderzoek nodig zijn. In plaats hiervan worden tegenwoordig ook wel 3-dimensionale stromingsmodellen gebruikt [43].

4.5.5 **Luchtkanalen**

Luchtkanalen worden vaak gemaakt van verzinkte staalplaat: ronde spiraal-gefelste buis voor kleine luchthoeveelheden en rechthoekige kanalen voor grote hoeveelheden (zie tabel 9.2 en 9.3). Spiraal-gefelste buis is er eveneens in ovale vorm. Kanalen en buizen maakt men ook wel van aluminium of roestvast staal, bijvoorbeeld als condensatie wordt verwacht, zoals bij keukens en badruimten. Kunststof wordt weinig gebruikt omdat bij verwarming een hinderlijke geur ontstaat. Ronde en ovale buizen verbindt men met popnagels en dicht de naden met aluminiumtape of met weefsel versterkte kunststoftape. Kleine rechthoekige kanalen worden ook wel zo gemonteerd. Het is beter om ze - net als grote kanalen - met flenzen, pakkingen en bouten luchtdicht te verbinden. Luchtkanalen hangt men meestal met draadeinden en beugels op, zo dat ze vrij kunnen uitzetten en krimpen.



Verstoring van het coanda-effect - Figuur 4.34



Hybride ventilatie - Figuur 4.35

Kanalen voor verwarming en koeling worden meestal thermisch geïsoleerd. Isolatie kan ook nodig zijn om te voorkomen dat ventilator- en stromingsgeluid tot verblijfsruimten doordringt. Isolatie wordt aan de buitenzijde van de kanalen aangebracht. Vaak gebruikt men hiervoor glaswol of minerale wol in de vorm van dekens of geperste platen die zijn afgedekt met een dampremmende laag van aluminium- of kunststoffolie. Is er kans op uitwendige condensatie, zoals bij kanalen voor gekoelde lucht of buitenlucht, dan past men ook wel kunststofschuim met gesloten celstructuur als isolatiemateriaal toe. Een jaar of twintig geleden werden kanalen vaak inwendig geïsoleerd om ventilator- en stromingsgeluid in het kanaal te absorberen. Tegenwoordig gebeurt dit niet meer vanwege het risico dat vezels uit het isolatiemateriaal losraken en in verblijfsruimten terecht komen waar ze hinder en zelfs gezondheidsklachten kunnen veroorzaken.

4.6 Hybride ventilatie

Hybride ventilatie is de combinatie van natuurlijke luchttoevoer en mechanische afvoer. Woningen worden doorgaans zo geventileerd. Als in de vakliteratuur over hybride ventilatie wordt gesproken bedoelt men meestal systemen met speciale gevelroosters die - met gebruikmaking van het coanda-effect - ervoor zorgen dat de buitenlucht langs het plafond stroomt en dieper in de ruimte dringt. De luchtsnelheid in dergelijke roosters is hoger dan in de roosters bij woningen. Om de luchtstroom beter te geleiden gebruikt men vaak aanvullend een geleideschoep, soms in de vorm van een gedeeltelijk verlaagd plafond (zie figuur 4.35). Verwarming van de ruimte vindt plaats met radiatoren of convectoren of met de geleideschoep uitgevoerd als stralingspaneel. Het beoogde voordeel van deze manier van ventileren is de geringere kans op tocht bij lage buitentemperaturen. De mogelijkheid om geen radiatoren te hoeven toe te passen wordt ook wel als voordeel genoemd.

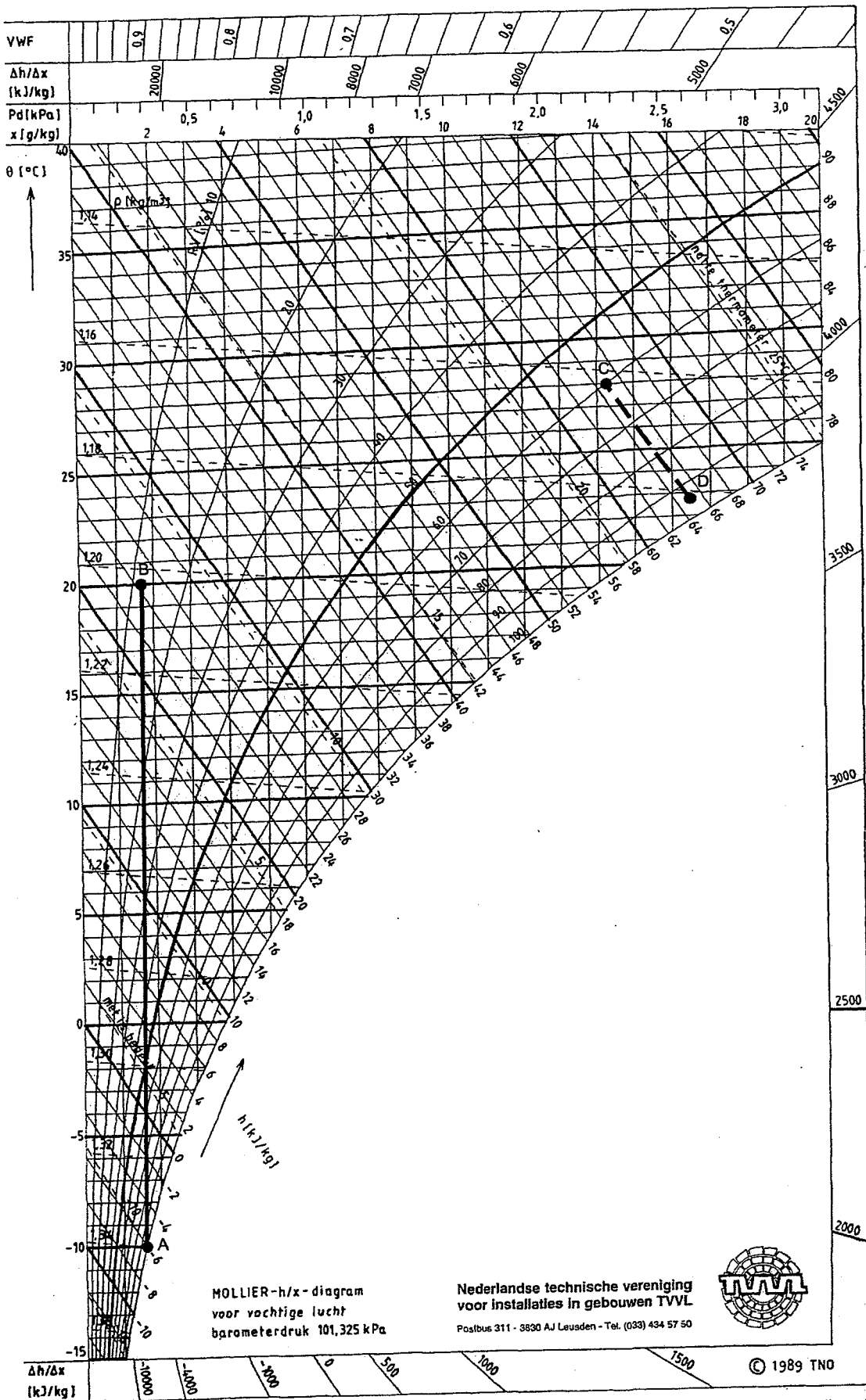
Met de geleideschoep, uitgevoerd als stralingspaneel, is eveneens te koelen. Vanwege de kans op condensatie is het koelvermogen aan de onderzijde maximaal 30 W/m^2 (zie paragraaf 4.4.3.2). Aan de bovenzijde vindt warmte-uitwisseling plaats door convectie tussen de schoep en de langs stromende lucht en door straling tussen de schoep en de bovenliggende constructie. De constructie koelt daardoor af en neemt vervolgens via convectie warmte uit de langs stromende lucht op. Het totale effect van de directe en de indirecte convectieve warmteoverdracht aan de bovenzijde is bij benadering 30 W/m^2 , zodat het totale koelvermogen van de schoep ongeveer 60 W/m^2 is.

Het specifieke koelvermogen van hybride ventilatie in combinatie met een gekoelde schoep, waarvan de oppervlakte gelijk is aan de helft van de vloeroppervlakte van de ruimte, is bij 2-voudige ventilatie met buitenlucht van $28 \text{ }^\circ\text{C}$ en een binnentemperatuur van maximaal $25 \text{ }^\circ\text{C}$, ca. 15 W/m^2 vloeroppervlakte. Dat is weinig vergeleken met natuurlijke koeling (25 à 30 W/m^2). Deze vergelijking is echter niet zuiver omdat bij natuurlijke koeling wordt toegestaan dat de ruimtetemperatuur $3 \text{ }^\circ\text{C}$ hoger wordt dan de buitentemperatuur. Zou dit bij hybride ventilatie in combinatie met een gekoelde schoep ook worden gedaan dan zou het specifieke koelvermogen 55 à 60 W/m^2 zijn. Maar dat is niet realistisch omdat bij mechanische koeling, waarbij om het beoogde koelvermogen te bereiken de ramen gesloten moeten blijven, zoals in dit geval, mensen andere verwachtingen hebben [44].

4.7 Vochtregeling

4.7.1 Luchtbevochtiging

Buitenlucht van $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ bevat maximaal 1,6 gram water per kilogram lucht, zie punt A in het Mollier-diagram (figuur 4.36). Wordt deze lucht aan een ruimte toegevoerd en tot $20 \text{ }^\circ\text{C}$ verwarmd dan wordt de relatieve vochtigheid in de ruimte theoretisch 11% (punt B). Zo droog zal het in werkelijkheid niet worden omdat de vochtaccumulerende gebouwmassa en de in de ruimte aanwezige personen, planten e.d. vocht afgeven. Desondanks zal de relatieve vochtigheid in gebouwen tijdens perioden met lage buitentemperaturen vaak niet hoger zijn dan 20 à 30% en kan luchtbevochtiging wenselijk zijn. Luchtbevochtiging kan met water of verzadigde stoom. Bij klimaatregeling gebeurt dit meestal centraal in een luchtbehandelingskast, het kan ook plaatselijk met losse apparaten. In bijlage 4 wordt het Mollier-diagram toegelicht en aangegeven hoe de conditie van lucht bij bevochtiging verandert.



Mollier-diagram met proces van verwarmen/ bevochtigen en directe adiabatische koeling - Figuur 4.36

4.7.2 Luchtbevochtiging t.b.v. koeling (adiabatische koeling)

Verdampend water onttrekt warmte aan de lucht waardoor de luchttemperatuur daalt. Dit proces, toegepast om lucht te koelen, noemen we "adiabatische" koeling. Bij *directe* adiabatische koeling (zie schema figuur 3.11) wordt de van buiten aangezogen lucht bevochtigd en aan de ruimte toegevoerd. Bijvoorbeeld lucht met conditie $\theta=28^\circ\text{C}$ en $\text{RV}=60\%$ (punt C in figuur 4.36) wordt door bevochtiging gekoeld tot $\theta=22,5^\circ\text{C}$ (punt D). Theoretisch is bevochtiging/koeling tot $\theta=22^\circ\text{C}$ en $\text{RV}=100\%$ mogelijk. Dit is praktisch niet haalbaar door de korte verblijfstijd van de lucht in de luchtbevochtiger en de niet homogene opname van het water in de lucht.

Bij *indirecte* adiabatische koeling (zie schema figuur 3.12) wordt de afvoerlucht bevochtigd (5) en met deze lucht vervolgens de van buiten aangezogen lucht gekoeld. De warmteoverdracht tussen beide luchtstromen gaat via warmtewisselaar (1). Het proces is in figuur 4.37 in een Mollier-diagram weergegeven. Door water te vernevelen neemt de luchtvochtigheid toe terwijl de warmteinhoud h (enthalpie) gelijk blijft. Punt A ($\theta=25^\circ\text{C}$, $\text{RV}=60\%$) is de conditie van de afvoerlucht vóór en punt B ($\theta=20^\circ\text{C}$, $\text{RV}=95\%$) ná bevochtiging. Punt C ($\theta=28^\circ\text{C}$, $\text{RV}=60\%$) is de conditie van de buitenlucht, deze wordt met de adiabatisch gekoelde afvoerlucht en een warmtewisselaar gekoeld tot punt D ($\theta=21,4^\circ\text{C}$, $\text{RV}=89\%$), met een koelbatterij - gevoed met gekoeld water van een koelmachine - gekoeld/gedroogd tot punt E ($\theta=16^\circ\text{C}$, $\text{RV}=100\%$) en daarna aan de ruimte toegevoerd. In de ruimte neemt de lucht warmte en vocht op en ontstaat de conditie weergegeven door punt A. De enthalpie van de lucht in punt C, D en E is respectievelijk 65, 58 en 45 kJ/kg. Bij dit voorbeeld is de besparing op koelenergie, in vergelijking met koeling met alleen een koelmachine: $(65 - 45) : (65 - 58) \times 100\% = 35\%$.

4.7.3 Luchtbevochtiging en -droging t.b.v. koeling (desiccative evaporative cooling)

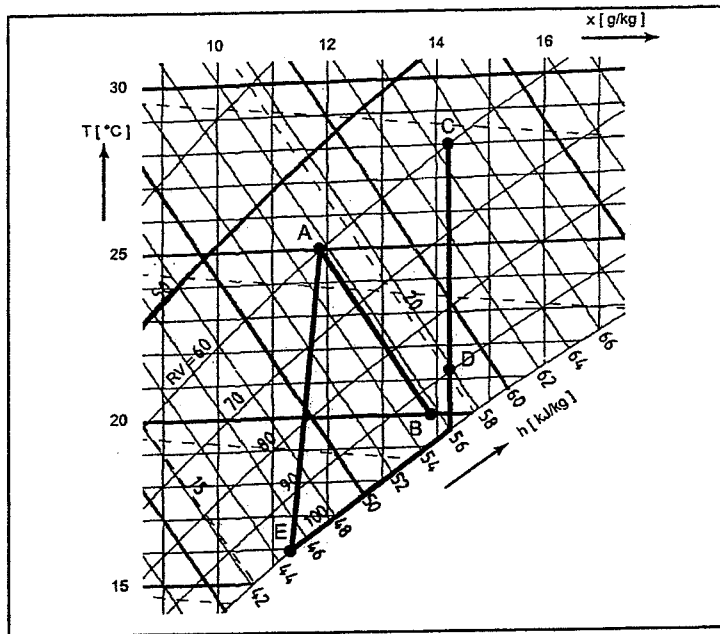
Bij "desiccative evaporative cooling" (DEC) wordt zowel de van buiten aangezogen lucht als de afvoerlucht door middel van bevochtiging adiabatisch gekoeld. Bovendien vindt warmte toevoer plaats om lucht te drogen waarna de toevoerlucht nog dieper is te koelen dan bij indirecte adiabatische koeling mogelijk is. Figuur 4.38 is een schema van dit proces.

Figuur 4.39 geeft het DEC-proces weer in een Mollier-diagram. Punt A ($\theta=28^\circ\text{C}$, $\text{RV}=60\%$) is de conditie van de buitenlucht. Deze lucht wordt met verwarmde afvoerlucht en een regeneratieve warmtewisselaar (1) verwarmd en gedroogd tot conditie B ($\theta=57^\circ\text{C}$, $\text{RV}=5\%$) en met (nog niet verwarmde) afvoerlucht en warmtewisselaar (2) gekoeld tot conditie C ($\theta=25^\circ\text{C}$, $\text{RV}=29\%$). Ventilator (3) geeft een beetje warmte af zodat conditie D ($\theta=27^\circ\text{C}$, $\text{RV}=26\%$) ontstaat. Hierna wordt de lucht met bevochtiger (4) op conditie E ($\theta=15^\circ\text{C}$, $\text{RV}=95\%$) gebracht en aan de ruimte toegevoerd. In de ruimte (5) neemt de lucht warmte en vocht op en ontstaat conditie F ($\theta=26^\circ\text{C}$, $\text{RV}=50\%$). Dit is tevens de conditie van de afvoerlucht uit de ruimte die met bevochtiger (6) op conditie G ($\theta=19^\circ\text{C}$, $\text{RV}=95\%$) en met warmtewisselaar (2) en de inmiddels tot 57°C verwarmde toevoerlucht op conditie H ($\theta=51^\circ\text{C}$, $\text{RV}=18\%$) wordt gebracht. Daarna wordt de afvoerlucht met warmtewisselaar (7) verwarmd tot conditie J ($\theta=85^\circ\text{C}$, $\text{RV}=3,5\%$). Met deze warme droge lucht en regeneratieve warmtewisselaar (1) wordt de verse toevoerlucht gedroogd en verwarmd en ontstaat de eerder genoemde conditie B ($\theta=57^\circ\text{C}$, $\text{RV}=5\%$).

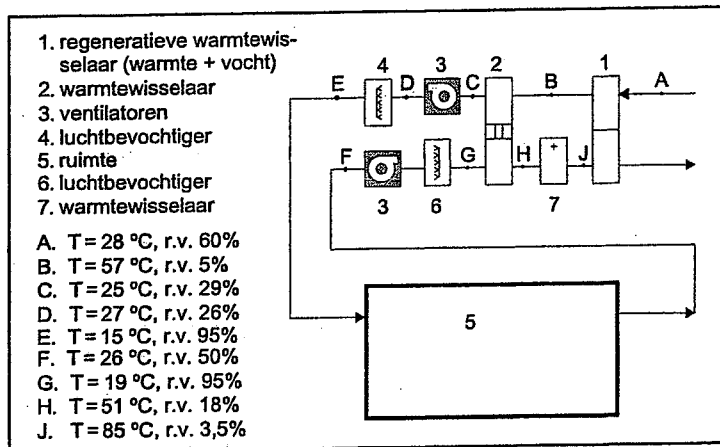
De warmte die via warmtewisselaar (7) aan het proces wordt toegevoerd kan afvalwarmte zijn, bijvoorbeeld uit de uitlaatgassen van een bij de productie van elektrische stroom gebruikte gasmotor of zonnewarmte. Als zonnewarmte wordt gebruikt, waarbij overigens minder hoge temperaturen worden bereikt, noemt men het proces "solar assisted desiccative evaporative cooling".

4.7.4 Luchtdrogen d.m.v. koeling

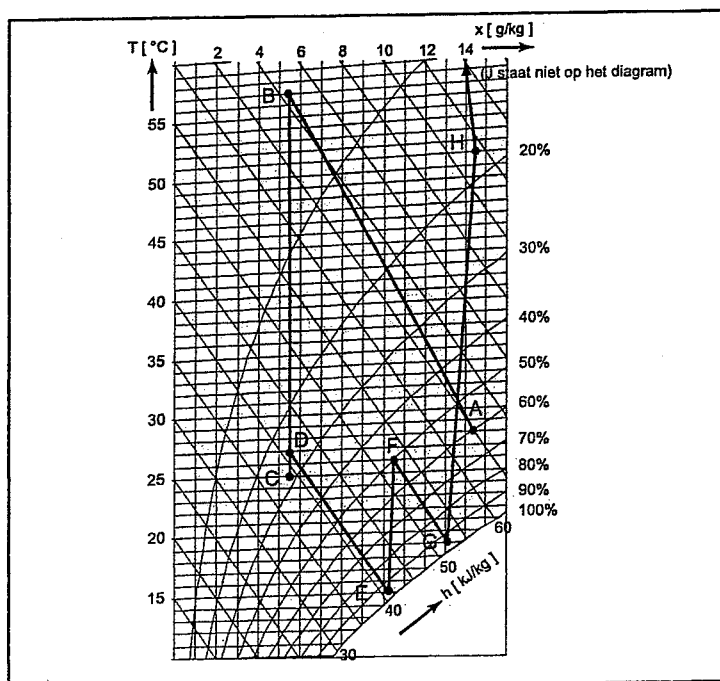
Lucht van 28°C kan maximaal 24 gram water per kg lucht bevatten. Buitenlucht van 28°C bevat zelden meer dan 16 gram water per kg lucht (punt A in figuur 4.40). Wordt deze lucht gekoeld tot (bijvoorbeeld) 16°C dan condenseert een deel van de waterdamp uit de lucht op de koelbatterij en neemt de absolute luchtvochtigheid af tot 10,6 g/kg (punt B). Dit proces noemt men "luchtdroging met koeling onder het dauwpunt". Na toevoer van deze gekoelde lucht aan een ruimte, waarin door warmtebelasting een temperatuur van 24°C heerst, ontstaat theoretisch een relatieve vochtigheid van 57% (punt C). In werkelijkheid zal de luchtvochtigheid door vocht afgifte van personen en vochtaccumulatie van bouw- en inrichtingsmaterialen iets hoger worden.



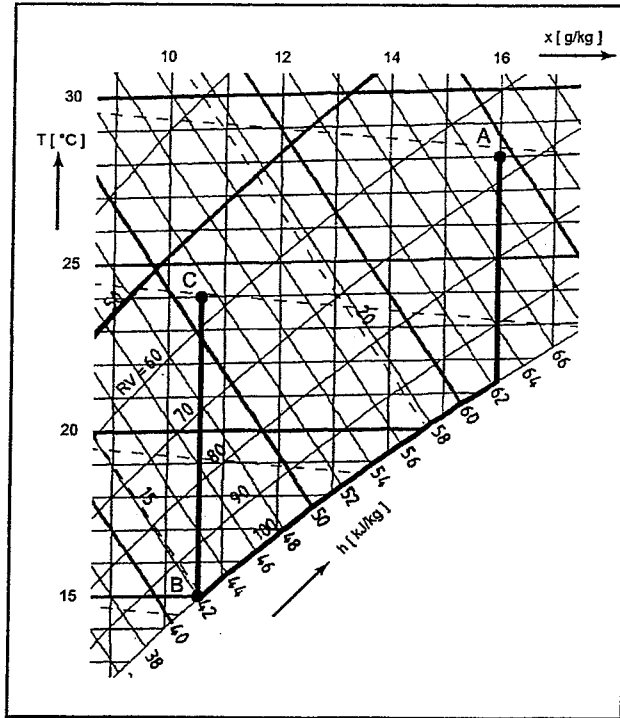
Proces indirecte adiatische koeling in Mollier-diagram - Figuur 4.37



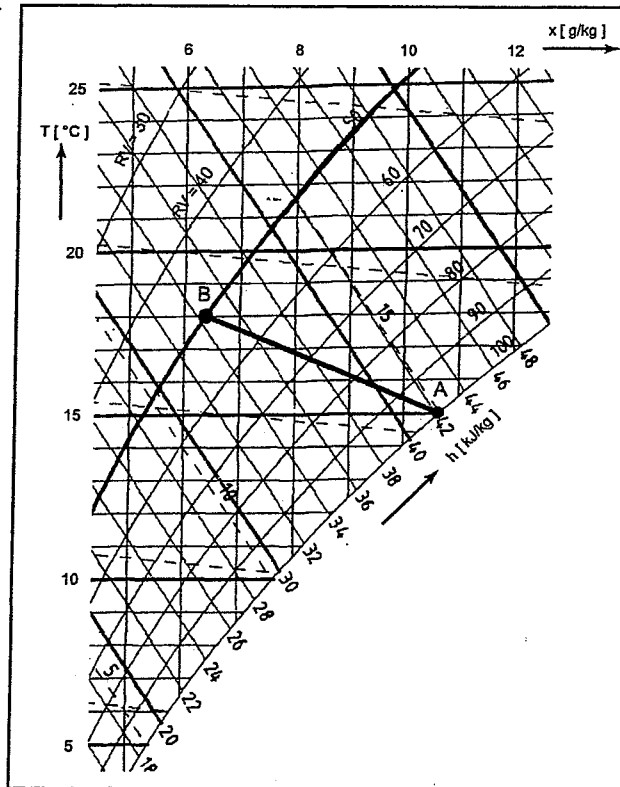
Schema DEC-koelproces - Figuur 4.38



DEC-koelproces in Mollierdigram (uitsnede) - Figuur 4.39



Proces drogen d.m.v. koelen in Mollier-diagram (uitsnede) - Figuur 4.40



Proces drogen d.m.v. adsorptie en absorptie in Mollier-diagram (uitsnede)
- Figuur 4.41