

# KLIMAATBEHEERSING 1

## WARMTECHNIEKEN

Ontwerp, aanleg, onderhoud en beheer

Fred de Lede  
Hans Wittens †  
Rob van den Berge  
Jan Koopmans



## Colofon

*Klimaatbeheersing 1 Warmtetechnieken – Ontwerp, aanleg, onderhoud en beheer*  
is een uitgave van VMN media.

Meer informatie over deze en andere uitgaven kunt u verkrijgen bij:

VMN media Klantenservice  
De Lasso Zuid 5C  
2371 EV Roelofarendsveen  
Telefoon: (088) 58 40 888  
E-mail: [klantenservice@vmnmedia.nl](mailto:klantenservice@vmnmedia.nl)  
Internet: [www.vakmedianetshop.nl](http://www.vakmedianetshop.nl)

Kijk ook op de site:  
[www.gawalo.nl](http://www.gawalo.nl)

Uitgever: Davey Cobben  
Redacteur: Patty van der Sar

Omslagontwerp: Anita Amptmeijer, [www.agraphics.nl](http://www.agraphics.nl), Apeldoorn  
Ontwerp binnenwerk: Anita Amptmeijer, [www.agraphics.nl](http://www.agraphics.nl), Apeldoorn  
Opmaak: AlphaZet prepress, Bodegraven

© VMN media, Zeist, 2023

1<sup>e</sup> druk, BIM Media B.V., Den Haag, 2014  
2<sup>e</sup> gewijzigde druk, BIM Media B.V., Den Haag, 2016  
3<sup>e</sup> druk, Vakmedianet B.V., Alphen aan den Rijn, 2017  
4<sup>e</sup> gewijzigde druk, Vakmedianet B.V., Alphen aan den Rijn, 2019  
5<sup>e</sup> herziene editie, VMN media, Zeist, 2023

ISBN 978-94-93196-77-3  
NUR 959

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een databestand en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, opnamen of anderszins, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenstellers en uitgever zijn zich volledig bewust van hun taak een zo betrouwbaar mogelijke uitgave te verzorgen. Niettemin kunnen zij geen aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele in deze uitgave voorkomende onjuistheden. Wij stellen het op prijs wanneer u aanvullingen, onjuistheden en verbeteringen aan ons wilt doorgeven.

## WOORD VOORAF

Door de grote zorg en aandacht voor het ontwerp en de detaillering van een gebouw (en dus voor het bouwfysische gedrag) wordt de behoefte aan warmte en koude tot een minimum teruggebracht. Wel blijven in de meeste situaties klimaatinstallaties nodig om te voldoen aan behaaglijkheidseisen. Bij een minimale warmte- of koudevraag van een gebouw bieden eenvoudige klimaatinstallaties soms al uitkomst. Meestal gaat dit samen met een laag energie- en grondstoffenverbruik. Een behaaglijk gebouw is niet per definitie een gebouw vol complexe installaties.

Klimaatinstallaties hebben als taak de berekende tekorten of overschotten aan warmte, vocht en ventilatie te compenseren, tot het niveau waarbij de behaaglijkheid in een gebouw gedurende de gebruiksperiode wordt gegarandeerd. In een vroeg stadium van het ontwerp kan met behulp van bouwfysische berekeningen een voorspelling worden gedaan over bijvoorbeeld de te verwachten warmtevraag van een gebouw (transmissieberekening), de optreden van de binnentemperaturen, de ventilatiebehoefte, de vochthuishouding, de akoestiek, de daglichttoetreding, enzovoort. Als ontwerpers onvoldoende zorg besteden aan het ontwerp en de detaillering van een gebouw (en dus ook aan de fysische vertaling), dan zal met klimaatinstallaties veel warmte en/of koude, vocht en/of droogte en ventilatielucht moeten worden aangevuld om aan behaaglijkheidseisen te voldoen. Dit heeft weer tot gevolg dat het energie- en grondstoffenverbruik veel hoger is dan nodig.

De laatste decennia besteedt men steeds meer aandacht aan het terugdringen van energieverbruik voor het verwarmen of koelen van gebouwen. Dit gebeurt enerzijds voor een kostenbesparing op lange termijn, anderzijds om het verbruik van fossiele brandstof en de uitstoot van CO<sub>2</sub> terug te dringen. Fossiele brandstof is schaars, maar uiteraard geldt dit voor de meeste zo niet alle grondstoffen.

Energiebesparing is een belangrijk thema in de hedendaagse bouw, binnen een breder kader van duurzaam bouwen. Denk maar aan de vele toetsingsmodellen die momenteel gebruikt worden, zoals Cradle-to-cradle, BREEAM, Greencalc en GPR. Wettelijk geldt in Nederland bij nieuwbouw de Energieprestatienorm, waarin het energiegebruik van gebouwen wordt begrensd. Deze norm is weer verplicht binnen Europees verband.

Technische installaties kunnen een grote invloed hebben op de bouwkundige planvorming en de architectuur van een gebouw. De architect moet om deze reden al in een vroeg stadium de consequenties overzien van de beslissingen die hij gedurende het ontwerpproces neemt. Klimaatinstallaties hebben binnen het ontwerpproces van gebouwen een zeer sterke samenwerking met enerzijds het gebouwon ontwerp (de integratie) en anderzijds de bouwfysica (de rekentechnieken).

Dit praktijkboek hebben wij geschreven om de theorie van warmtetechnieken te verduidelijken en de toepassingen van warmtetechnieken praktisch uit te leggen. De rode draad loopt van de theoretische verbrandingstechniek naar het praktische beheer van installaties. Verder schenken we de nodige aandacht aan wet- en regelgeving. *Warmtetechnieken* is fraai vormgegeven door uitgebreid kleurgebruik, overzichtelijke tabellen en functionele tekeningen. Wij hopen dat dit boek een onmisbaar naslagwerk wordt voor iedereen die in de praktijk met warmtetechnieken te maken heeft.

Tijdens de voorbereidingen van de 1<sup>e</sup> druk is in januari 2014 onze medeauteur Hans Wittens overleden. Hans heeft niet meer kunnen meemaken dat het eerste exemplaar gereed was. Wij willen Hans bedanken voor zijn inbreng en gedenken hem als een goede auteur en gedreven docent.

Z.O.Z.

Inmiddels is het boek alweer toe aan zijn 5<sup>e</sup> druk. Wij hebben deze editie grondig herzien en aangepast aan de laatste stand van zaken. Onze speciale dank gaat uit naar:

- Hans Burgers, docent bij NCOI, die hoofdstuk 14 Regelingen en gebouwbeheersystemen heeft geactualiseerd en uitgebreid;
- George Wels, branchemanager NVI/Rogafa voor het beschikbaar stellen van beugelvoorschriften voor rookgasafvoersystemen;
- Maurice Cohen Paraira voor het kritisch nalezen van alle hoofdstukken.

Juni 2023

Fred de Lede

Hans Wittens †

Rob van den Berge

Jan Koopmans

# INHOUD

|             |                                                                       |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
|             | INLEIDING                                                             | 15  |
| DEEL I      | WARMTEOPWEKKING                                                       | 19  |
| HOOFDSTUK 1 | ONTWIKKELING VAN VERWARMINGSTECHNIEKEN                                | 21  |
|             | 1.1 GESCHIEDENIS VAN VERWARMINGSSYSTEMEN                              | 22  |
|             | 1.2 HUIDIGE GENERATIE VERWARMINGSSYSTEMEN                             | 24  |
|             | 1.3 DUURZAME ONTWIKKELING VAN VERWARMINGSSYSTEMEN                     | 27  |
|             | 1.4 GEOTHERMISCHE ENERGIE: BODEM- EN AARDWARMTE                       | 29  |
|             | 1.5 BIO-ENERGIE ALS ENERGIEBRON                                       | 30  |
|             | 1.6 TRIAS ENERGETICA                                                  | 31  |
| HOOFDSTUK 2 | GASGESTOOKTE CV-KETELS                                                | 33  |
|             | 2.1 CV-KETELS INDELEN NAAR EIGENSCHAPPEN                              | 34  |
|             | 2.2 COMPACTE CV-KETELS                                                | 35  |
|             | 2.3 MIDDELGROTE CV-KETELS                                             | 43  |
|             | 2.4 GROTE OVERDRUK-CV-KETELS                                          | 46  |
|             | 2.5 HEETWATER- EN STOOMKETELS                                         | 47  |
|             | 2.6 ROOKGASAFVOERSYSTEMEN                                             | 49  |
|             | 2.7 JAARBELASTINGDUURKROMME                                           | 58  |
| HOOFDSTUK 3 | WARMTEKRACHTKOPPELING EN GASABSORPTIE                                 | 61  |
|             | 3.1 WERKING VAN WARMTEKRACHTKOPPELING                                 | 62  |
|             | 3.2 UITVOERINGSVORMEN VAN WKK-OPWEKKER                                | 66  |
|             | 3.3 GASABSORPTIEWARMTEPOMP                                            | 68  |
| HOOFDSTUK 4 | WARMTEPOMPEN EN WARMTE-KOUDEOPSLAGSYSTEMEN                            | 73  |
|             | 4.1 WERKING VAN WARMTEPOMPEN                                          | 74  |
|             | 4.2 CARNOTRENDIMENT, COP, SPF EN PER                                  | 75  |
|             | 4.3 UITVOERINGSVORMEN VAN WARMTEPOMPEN                                | 77  |
|             | 4.4 WARMTE-KOUDEOPSLAGSYSTEMEN                                        | 79  |
| HOOFDSTUK 5 | ZONNE-ENERGIE                                                         | 85  |
|             | 5.1 WERKING VAN ZONNECOLLECTOREN                                      | 86  |
|             | 5.2 RENDEMENT VAN ZONNECOLLECTOREN                                    | 88  |
|             | 5.3 DRIE VEELVOORKOMENDE ZONNEBOILERSYSTEMEN                          | 89  |
|             | 5.4 EISEN AAN TECHNISCH ONTWERP EN UITVOERING VAN ZONNEBOILERSYSTEMEN | 91  |
| HOOFDSTUK 6 | VERBRANDINGSTECHNIEKEN                                                | 95  |
|             | 6.1 BRANDSTOFFEN                                                      | 96  |
|             | 6.2 EIGENSCHAPPEN VAN AARDGAS                                         | 97  |
|             | 6.3 VERBRANDING VAN AARDGAS                                           | 101 |
|             | 6.4 EIGENSCHAPPEN VAN VLOEIBARE BRANDSTOFFEN                          | 115 |
|             | 6.5 VERBRANDING VAN VLOEIBARE BRANDSTOFFEN                            | 118 |
|             | 6.6 RENDEMENT EN CONDENSATIEWARMTE                                    | 120 |
|             | 6.7 EIGENSCHAPPEN VAN WATERSTOFGAS                                    | 125 |
|             | 6.8 VERBRANDING VAN WATERSTOFGAS                                      | 126 |

## INHOUD

|              |                                                           |     |
|--------------|-----------------------------------------------------------|-----|
| DEEL II      | WARMTEDISTRIBUTIE                                         | 129 |
| HOOFDSTUK 7  | DISTRIBUTIESYSTEMEN                                       | 131 |
|              | 7.1 VERWARMINGSSYSTEEM KIEZEN                             | 132 |
|              | 7.2 WARMTEDRAGENDE MEDIA                                  | 132 |
|              | 7.3 CENTRALE WARMWATERVERWARMINGSSYSTEMEN                 | 133 |
| HOOFDSTUK 8  | CV-LEIDINGEN DIMENSIONEREN                                | 139 |
|              | 8.1 BESCHIKBARE BEREKENINGSMETHODEN                       | 140 |
|              | 8.2 ONDERDELEN VAN DRUKVERLIESBEREKENING                  | 141 |
|              | 8.3 TOTALE DRUKVERLIESBEREKENING                          | 146 |
| HOOFDSTUK 9  | MATERIALEN VOOR VERWARMINGSINSTALLATIES                   | 151 |
|              | 9.1 METALEN LEIDINGEN                                     | 152 |
|              | 9.2 KUNSTSTOFLEIDINGEN                                    | 154 |
|              | 9.3 ISOLATIE VAN CV-LEIDINGEN                             | 156 |
|              | 9.4 TERREINLEIDINGEN                                      | 158 |
|              | 9.5 LEIDINGEN BEVESTIGEN EN OPHANGEN                      | 158 |
| HOOFDSTUK 10 | HYDRAULISCHE SCHAKELINGEN                                 | 161 |
|              | 10.1 HYDRAULISCHE SCHEMA'S EN ACTIEVE EN PASSIEVE MODULEN | 162 |
|              | 10.2 CASCADESCHAKELINGEN                                  | 164 |
|              | 10.3 KLEPKARAKTERISTIEKEN EN KLEPVORMEN                   | 166 |
| HOOFDSTUK 11 | CIRCULATIEPOMPEN                                          | 175 |
|              | 11.1 CENTRIFUGAALPOMPEN EN HUN KARAKTERISTIEKEN           | 176 |
|              | 11.2 POMPEN MONTEREN                                      | 191 |
|              | 11.3 TOERENREGELING EN REGELINGSCYCLI                     | 192 |
|              | 11.4 DE ErP-RICHTLIJN VOOR CIRCULATIEPOMPEN               | 199 |
| HOOFDSTUK 12 | EXPANSIEVATEN INCLUSIEF EXPANSIEAUTOMATEN                 | 201 |
|              | 12.1 TYPEN EXPANSIEVATEN                                  | 202 |
|              | 12.2 INHOUD VAN EXPANSIEVATEN BEREKENEN                   | 206 |
| HOOFDSTUK 13 | BEVEILIGINGEN                                             | 211 |
|              | 13.1 DRUKBEVEILIGINGEN                                    | 212 |
|              | 13.2 TEMPERATUURBEVEILIGINGEN                             | 217 |
|              | 13.3 WATERGEBREKBEVEILIGINGEN                             | 219 |
|              | 13.4 VLAMBEVEILIGINGEN                                    | 220 |
| HOOFDSTUK 14 | REGELINGEN EN GEBOUWBEHEERSYSTEMEN                        | 223 |
|              | 14.1 THEORIE VAN EEN REGELKRING                           | 224 |
|              | 14.2 PRAKTISCHE TOEPASSINGEN VAN REGELINGEN               | 237 |
|              | 14.3 GEBOUWBEHEERSYSTEMEN                                 | 248 |
| DEEL III     | WARMTEAFGIFTE                                             | 257 |
| HOOFDSTUK 15 | THERMISCH COMFORT EN BEHAAGLIJKHEID                       | 259 |
|              | 15.1 FACTOREN DIE BEHAAGLIJKHEIDGEOEL BEÏNVLOEDEN         | 260 |
|              | 15.2 THERMISCHE BEHAAGLIJKHEIDCRITERIA                    | 262 |
|              | 15.3 BEHAAGLIJKHEIDMODELLEN                               | 267 |
|              | 15.4 BEHAAGLIJKHEIDEISEN AAN VERWARMINGSINSTALLATIES      | 270 |
| HOOFDSTUK 16 | WARMTEVERLIESBEREKENING                                   | 275 |
|              | 16.1 BASIS VAN WARMTEVERLIESBEREKENING                    | 277 |
|              | 16.2 GENORMEERDE SCHILTRANSMISSIEBEREKENING               | 280 |
|              | 16.3 SCHILTRANSMISSIEBEREKENING VAN HOEKWONING            | 289 |

|              |                                                          |     |
|--------------|----------------------------------------------------------|-----|
| HOOFDSTUK 17 | <b>RADIATOREN EN BUISELEMENTEN</b>                       | 293 |
|              | 17.1 GLADDE BUIZEN EN RIBBENBUIZEN                       | 294 |
|              | 17.2 TYPEN RADIATOREN                                    | 297 |
|              | 17.3 JUISTE RADIATOR KIEZEN: WARMTEAFGIFTE BEPALEN       | 298 |
|              | 17.4 RADIATOREN AANSLUITEN EN ONDERHOUDEN                | 306 |
| HOOFDSTUK 18 | <b>CONVECTOREN</b>                                       | 313 |
|              | 18.1 CONVECTOREN: VRIJSTAAND OF INGEBOUWD                | 314 |
|              | 18.2 WARMTEAFGIFTE VAN CONVECTOREN                       | 316 |
|              | 18.3 CONVECTOREN AANSLUITEN EN ONDERHOUDEN               | 320 |
|              | 18.4 VENTILATORCONVECTOREN                               | 322 |
| HOOFDSTUK 19 | <b>VLOER- EN WANDVERWARMING</b>                          | 325 |
|              | 19.1 KENMERKEN VAN VLOERVERWARMING                       | 326 |
|              | 19.2 WARMTEAFGIFTE VAN VLOERVERWARMING BEREKENEN         | 328 |
|              | 19.3 INSTALLATIEMATERIALEN                               | 333 |
|              | 19.4 BOUWKUNDIGE VLOEROPBOUW                             | 337 |
|              | 19.5 VOORBEELDBEREKENING VAN VLOERVERWARMINGSINSTALLATIE | 342 |
|              | 19.6 TOEPASSINGEN VAN VLOERVERWARMING                    | 346 |
|              | 19.7 WANDVERWARMING                                      | 348 |
| DEEL IV      | <b>OPLEVERING, ONDERHOUD EN BEHEER</b>                   | 353 |
| HOOFDSTUK 20 | <b>GARANTIE, OPLEVERING, BEDIENING EN ONDERHOUD</b>      | 355 |
|              | 20.1 OPLEVERING EN GARANTIE                              | 356 |
|              | 20.2 ONDERHOUDS- EN BEDIENINGSVOORSCHRIFTEN              | 359 |
|              | 20.3 ONDERHOUDSCONTRACTEN                                | 360 |
| HOOFDSTUK 21 | <b>EISEN AAN STOOK-INSTALLATIES EN -RUIMTEN</b>          | 371 |
|              | 21.1 BOUWBESLUIT 2012                                    | 372 |
|              | 21.2 WET MILIEUBEHEER: ACTIVITEITENBESLUIT 2021          | 373 |
|              | 21.3 SCIOS: SCOPES EN INSPECTIE UPDATE 2022              | 374 |
|              | 21.4 NEN 3028-2022: EISEN VOOR VERBRANDINGSINSTALLATIES  | 375 |
|              | 21.5 NEN 1078: VOORZIENING VOOR GAS IN NIEUWBOUW         | 384 |
|              | 21.6 NEN 8078: VOORZIENING VOOR GAS IN BESTAANDE BOUW    | 385 |
|              | 21.7 OMGEVINGSWET                                        | 385 |
|              | 21.8 GASKETELWET                                         | 392 |
|              | <b>LITERATUUR</b>                                        | 395 |
| BIJLAGE A    | <b>LIJST VAN SYMBOLEN</b>                                | 397 |
|              | A.1 GROOTHEDEN EN EENHEDEN                               | 399 |
|              | A.2 TEKENSYMBOLEN                                        | 401 |
| BIJLAGE B    | <b>BEGRIPPENLIJST</b>                                    | 405 |
|              | B.1 MASSA EN HOEVEELHEID                                 | 405 |
|              | B.2 VOLUME                                               | 406 |
|              | B.3 TEMPERATUUR                                          | 406 |
|              | B.4 WARMTE                                               | 407 |
|              | B.5 ENERGIE                                              | 409 |
|              | B.6 DRUK EN DICHTHEID                                    | 410 |
|              | B.7 VLOEISTOFFEN, GASSEN EN VOCHTIGE LUCHT               | 411 |
|              | B.8 GASWETTEN                                            | 412 |
|              | B.9 UITZETTING DOOR WARMTE                               | 413 |
| BIJLAGE C    | <b>FORMULIER VOOR TRANSMISSIEBEREKENINGEN</b>            | 415 |
|              | <b>REGISTER</b>                                          | 417 |

# INLEIDING

*Warmtetechnieken* behandelt verwarmingsinstallaties in de gebouwde omgeving. Er zijn vier delen, die elk een thema behandelen. Het eerste deel gaat over warmteopwekking. We beginnen met wat geschiedenis van de verwarmingstechnieken. Diverse warmteopwekkers zoals gasgestookte ketels en warmtepompen komen daarbij aan bod. Ook gaan we bijvoorbeeld in op verbrandingstechnieken. Vervolgens behandelen we in het tweede deel warmtedistributiesystemen, inclusief leidingssystemen, expansievaten, pompen en regelingen. Voordat we in het derde deel ingaan op warmteafgiftesystemen zoals radiatoren, convectoren en vloeren wandverwarming, staan we stil bij de behaaglijkheidcriteria en het maken van een warmteverliesberekening. Het vierde deel betreft de oplevering en het beheer van de installatie plus de huidige wet- en regelgeving voor stookruimten.

## DEEL I – WARMTEOPWEKKING

### Hoofdstuk 1 – Ontwikkeling van verwarmingstechnieken

In dit hoofdstuk behandelen we chronologisch de diverse systemen voor gebouwverwarming. De Romeinen zijn de grondleggers van het huidige cv-systeem. Door het ruim beschikbaar zijn van aardgas zijn er veel gasgestookte ketels, steeds meer in een condenserende uitvoering. Vanwege de uitputting van de fossiele brandstoffen en de toenemende verduurzaming zullen we steeds meer zonne-energie en bodemwarmte in combinatie met warmtepompen en geothermie inzetten.

### Hoofdstuk 2 – Gasgestookte cv-ketels

In dit hoofdstuk beschrijven we uitgebreid de diverse uitvoeringen van gasgestookte cv-ketels. We gaan in op de atmosferische ketel, de overdrukketel en specifiek de compacte HR-ketelunit zoals deze op vele locaties wordt toegepast. Ook de diverse rookgasafvoersystemen komen aan bod.

### Hoofdstuk 3 – Warmtekrachtkoppeling en gasabsorptie

In dit hoofdstuk hebben we het over duurzame en energiebesparende warmteopwekking. We gaan we in op de diverse uitvoeringsvormen van wkk-installaties en op gasabsorptie-warmtepompen. Daarbij geven we rekenvoorbeelden van energiebesparing versus investeringskosten.

### Hoofdstuk 4 – Warmtepompen en warmte-koudeopslagsystemen

In dit hoofdstuk kijken we naar warmtepompen en wko-systemen. Via warmtepompen kunnen we via dezelfde installatie zowel warmte als koude opwekken, met 'gratis' energie. Deze energie onttrekken we aan de buitenlucht, bodem/grondwater of oppervlaktewater. Omdat deze energie laagwaardig is, waarderen we deze met behulp van een warmtepomp, meestal in de uitvoering van een koelmachine, op.

### Hoofdstuk 5 – Zonne-energie

In dit hoofdstuk behandelen we zonnecollectoren. Deze kunnen we gebruiken voor de bereiding van tapwater en voor gebouwverwarming. In beide gevallen is complementaire verwarming door een ketelinstallatie of warmtepomp noodzakelijk, al is het maar om de watertemperatuur te regelen. We omschrijven de diverse systemen en hun aanleg en dimensionering.

### Hoofdstuk 6 – Verbrandingstechnieken

In dit hoofdstuk leggen we zowel voor de gas- als oliebranderinstallatie uit hoe het ontsteken en ontbranden van een brandstof/lucht-mengsel plaatsvindt. Daarbij komen de chemische elementen die in lucht, gas/olie en rookgassen voorkomen aan bod. Ook hebben we het over de vorming en beheersing van NO<sub>x</sub>.

**DEEL II – WARMTEDISTRIBUTIE****Hoofdstuk 7 – Distributiesystemen**

In dit hoofdstuk beschrijven we leidingsystemen, overdrachtsmedia, verdelers en aansluitmogelijkheden.

**Hoofdstuk 8 – Cv-leidingen dimensioneren**

In dit hoofdstuk behandelen we het berekenen van leidingweerstand en de eenmalige weerstanden door bochten, knieën, enzovoort. Daarbij gebruiken we diverse relevante tabellen.

**Hoofdstuk 9 – Materialen voor verwarmingsinstallaties**

In dit hoofdstuk gaan we in op materialen die we in de installatietechniek toepassen. De laatste decennia gebruiken we steeds meer kunststof. Door de betere isolatiewaarden worden lagere systeemtemperaturen mogelijk en wordt kunststof steeds interessanter. Diverse bevestigingsmaterialen komen beknopt aan bod.

**Hoofdstuk 10 – Hydraulische schakelingen**

In dit hoofdstuk bekijken we de regel- en aansluitmogelijkheden van installaties. Ook bespreken we het toepassen van twee- en driewegkleppen en het menginjectiesysteem.

**Hoofdstuk 11 – Circulatiepompen**

In dit hoofdstuk behandelen we de diverse pomptypen met de regelmogelijkheden in een installatie. Energieverbruik wordt steeds belangrijker. De plaatsing en regeling van pompen hebben een belangrijke invloed op het verbruik. Ook schenken we aandacht aan de nieuwe ErP-regeling voor circulatiepompen en aan de toepassing van de diverse pompuitvoeringen.

**Hoofdstuk 12 – Expansievaten inclusief expansieautomaten**

In dit hoofdstuk bespreken we de verschillende typen expansievaten en ontluchtingsvoorzieningen. Lucht in de installatie vermindert de werking van de installatie. De laatste decennia zijn de automatische ontluchtingssystemen onder de aandacht gekomen. Verder gaan we in op de plaatsing van een drukexpansievat en geven we een voorbeeld van een inhoudsberekening.

**Hoofdstuk 13 – Beveiligingen**

In dit hoofdstuk beschrijven we beveiligingen. Die zijn noodzakelijk om installaties veilig te kunnen laten functioneren. Warmwater, heetwater en stoom kunnen verbranding veroorzaken en tot explosies leiden. Aardgas kan ook explosies veroorzaken en een gevaar vormen bij inademing, zeker bij de vorming van koolmonoxide. We gaan in op druk-, temperatuur-, watergebrek- en vlambeveiligingen.

**Hoofdstuk 14 – Regelingen en gebouwbeheersystemen**

In dit hoofdstuk behandelen we regelingen die zorgen dat processen automatisch verlopen. In de gebouwde omgeving passen we eindeloos veel regelingen toe, van eenvoudig tot ingewikkeld. Denk bijvoorbeeld aan een thermostatische radiatorafsluiter die een vertrektemperatuur in stand houdt. We gaan in op de theorie van een regelkring, praktische toepassingen van regelingen en gebouwbeheersystemen.

**DEEL III – WARMTEAFGIFTE****Hoofdstuk 15 – Thermisch comfort en behaaglijkheid**

In dit hoofdstuk kijken we naar factoren die een rol spelen bij het realiseren van comfort en behaaglijkheid, behaaglijkheidscriteria en behaaglijkheidsmodellen. Met een verwarmingsinstallatie moeten we een comfortabel en behaaglijk binnenklimaat creëren voor de gebruiker van een gebouw. Hiervoor hebben we technische kennis nodig en dienen we op de hoogte te zijn van wat nou eigenlijk comfortabel en behaaglijk is voor de mens en wat niet.

**Hoofdstuk 16 – Warmteverliesberekening**

In dit hoofdstuk leggen we het maken van een transmissieberekening uit aan de hand van ISSO-publicatie 51. Verder geven we een berekeningsvoorbeeld van het opstellen van een eenvoudige schilberekening voor het vaststellen van de benodigde warmtecapaciteit bij de uitwerking van het voorlopige ontwerp.

## DEEL IV – OPLEVERING, ONDERHOUD EN BEHEER

### Hoofdstuk 17 – Radiatoren en buiselementen

In dit hoofdstuk behandelen we de warmteafgifte van ribbenbuizen en radiatoren. Paneel- en kolomradiatoren komen aan bod en ook het gebruik van overtemperaturen voor de bepaling van de warmteafgifte van de radiatoren.

### Hoofdstuk 18 – Convectoren

In dit hoofdstuk gaan we in op de toepassing en selectie van convectoropstellingen, het afgegeven vermogen, de juiste plaatsing van de convector bij raampartijen, de relatie tussen warmteafgifte en schachthoogte en de toepassing van ventilatorconvectoren met een lage inbouwhoogte.

### Hoofdstuk 19 – Vloer- en wandverwarming

In dit hoofdstuk leggen we de toepassingsmogelijkheden, het ontwerp en de selectie van de vloer- en wandverwarmingssystemen uit. We geven een compleet berekeningsvoorbeeld. Ook gaan we in op de keuze van de hart-op-hartafstanden van de vloerverwarmingsbuis in relatie tot de ruimte en mediumtemperaturen.

### Hoofdstuk 20 – Garantie, oplevering, bediening en onderhoud

In dit hoofdstuk behandelen we de garantie, de oplevering, de bediening en het onderhoud van installaties. Daarbij gaan we in op de inspectiemethoden die in Nederland vaak worden toegepast conform de BOEI-methodiek van de Rijksvastgoedbedrijf. Ook leggen we de toepassing van de NEN 2767 uit en het opstellen van een meerjarenbegroting.

### Hoofdstuk 21 – Eisen aan stookinstallaties en -ruimten

In dit laatste hoofdstuk beschrijven we de veiligheidseisen die op gas stoken van toepassing zijn. Zo moeten we er zeker van zijn dat er voor het verbrandingsproces voldoende buitenlucht toegevoerd wordt naar het ketelhuis. Verder behandelen we de uit te voeren keuringen en inspecties.

### Literatuur

In de literatuurlijst vermelden we de geraadpleegde en aanbevolen literatuur. De lezer kan hier de behandelde onderwerpen in terugvinden en aanvullende informatie.

### Bijlage A – Lijst van symbolen

In bijlage A zetten we lettersymbolen van grootheden en eenheden uit het boek en teken-symbolen die we kunnen gebruiken bij het lezen en maken van installatietekeningen.

### Bijlage B – Begrippenlijst

In bijlage B geven we een overzicht van warmtetechnische begrippen. Oorspronkelijk zijn het natuurkundige en scheikundige begrippen. We moeten ze hanteren voor het vastleggen van gegevens en het uitwerken van formules. Verder geven we een uitleg van natuurkundige wetten en komen er diverse formules aan bod.

### Bijlage C – Formulier voor transmissieberekeningen

In bijlage C bieden we een kopieerbaar invulformulier voor transmissieberekeningen.

# HOOFDSTUK 1

## ONTWIKKELING VAN VERWARMINGSTECHNIEKEN



## ONTWIKKELING VAN VERWARMINGSTECHNIEKEN

De laatste tientallen jaren worden steeds meer efficiënte en energiezuinige verwarmingssystemen ontwikkeld en toegepast. Omdat de voorraden fossiele brandstoffen uitgeput raken en de CO<sub>2</sub>-doelstellingen streng zijn, verschuift de aandacht nog meer naar klimaatneutrale warmtevoorzieningen. We zetten onder andere de condenserende gasgestookte ketels (HR) op grote schaal in. Die zijn zuinig maar verbruiken wel fossiele brandstof.

Het is noodzakelijk om het energieverbruik nog verder terug te dringen. Hiervoor moeten we van fossiele energiebronnen omschakelen naar duurzame, hernieuwbare energiebronnen. Voor gebouwverwarming gebruiken we steeds meer duurzame brandstoffen, zonne-energie en bodem- en aardwarmte.

In dit hoofdstuk gaan we in op:

- de geschiedenis van de verwarmingssystemen;
- de huidige generatie verwarmingssystemen;
- de duurzame ontwikkeling van verwarmingssystemen;
- geothermische energie (bodem- en aardwarmte);
- bio-energie als energiebron;
- de trias energetica.

### 1.1 GESCHIEDENIS VAN VERWARMINGSSYSTEMEN

Al ruim 2000 jaar bestaan er systemen voor het verwarmen van gebouwen, sinds de oude Romeinen hun beroemde thermen, publieke badhuizen, bouwden (zie afbeelding 1.1). Zij ontwikkelden een slim systeem om warmte centraal op te wekken en te distribueren naar diverse vertrekken van een gebouw. Lucht werd in de kelder verwarmd en van onderaf het gebouw in gebracht. De warme lucht droeg daarna de warmte over aan bouwkundige schachten. Door het verschil in dichtheid tussen koude en warme lucht steeg de lucht vanzelf op, zonder gebruik van ventilatoren.



Afbeelding 1.1: De restanten van een therm. Bron: Thermenmuseum Heerlen.

## 1.1 GESCHIEDENIS VAN VERWARMINGSSYSTEMEN

Rond 1900 maakten ook de eerste watervoerende verwarmingssystemen gebruik van dit verschil in dichtheid, zodat er geen pomp nodig was. Het transport van het warmwater via buizen berustte op natuurlijke circulatie door een temperatuur- en dichtheidsverschil tussen het warme aanvoerwater en het afgekoelde retourwater. Het dichtheidsverschil was echter klein, waardoor voor een goede circulatie ook de leidingweerstand zeer klein moesten zijn. Dit was mogelijk dankzij grote leidingdiameters. De buizen waren zowel qua diameter als wanddikte aanmerkelijk groter uitgevoerd dan de huidige leidingen.

Het systeem van natuurlijke circulatie was niet geschikt voor gebouwen met meerdere bouwlagen. Sinds de tweede helft van de 20e eeuw passen we daarom voor cv-systemen circulatiepompen toe. Voor hoogbouw zetten we aanvullend fundatiepompen in; zie hoofdstuk 11.

Vóór de grootschalige inzet van aardgas werden in Nederland in de jaren 1950 en 1960 vaste brandstoffen gestookt, zoals hout en kolen. Dit gebeurde met warmwaterketels, de zogeheten 'atmosferische toestellen'; zie hoofdstuk 2. Daarin werd de benodigde verbrandingslucht aangezogen door onderdruk. Die ontstond als gevolg van de thermische trek in de schoorsteen. Hoe hoger de schoorsteenhoogte was in combinatie met een hoge temperatuur van de rookgassen, des te meer onderdruk er werd opgewekt in het verwarmingstoestel.

De atmosferische warmwaterketels werden opgebouwd uit gietijzeren leden. Bij oudere installaties kun je ze af en toe nog tegenkomen. Aan hun robuuste uitvoering danken ze hun hoge leeftijd, vaak ouder dan 30 jaar. Het vervangen en slopen ervan wordt soms uitgesteld omdat daarbij asbest kan vrijkomen. Asbest verwijderen is duur en vereist vergunningen.

In een later stadium zijn overdrukketels toegepast (zie afbeelding 1.2). Daarin voert een ventilator de benodigde verbrandingslucht toe aan de ketelinstallatie. Hoge schoorstenen in combinatie met hoge rookgastemperaturen zijn niet meer noodzakelijk. Hierdoor kan de rookgastemperatuur verlaagd worden, voor het stoken van andere brandstoffen dan hout, kolen en (zware) olie. Lagere schoorsteentemperaturen hebben een hoger stookrendement tot gevolg. Aardgas bevat minder zwavel waardoor de rookgastemperatuur verder verlaagd kan worden, omdat een zuurdauwpunt ontbreekt; zie ook hoofdstuk 6. Moderne hoogrendements (HR) cv-ketels kunnen zo maximaal gebruikmaken van de warmtewinst door condensatie.



Afbeelding 1.2: Een overdrukketel. Bron: WTCB.

## ONTWIKKELING VAN VERWARMINGSTECHNIKEN

De werktuigkundige inzichten en mogelijkheden op het gebied van automatisering nemen steeds verder toe. De huidige cv-systemen functioneren volautomatisch en onbewaakt. In grotere gebouwen nemen we de regeling van cv-systemen vaak op in een gebouwbeheersysteem (GBS). Ook in woningen gebruiken we meer en meer intelligente regelaars die de ruimtetemperatuur regelen. Voor woningen, met name zorgwoningen of levensloopbestendige woningen, is verdere automatisering en besturing op afstand in opmars, de domotica (zie afbeelding 1.3).



Afbeelding 1.3: Een voorbeeld van domotica. Bron: Electra-Gigant.

## 1.2 HUIDIGE GENERATIE VERWARMINGSSYSTEMEN

In deze paragraaf geven we een kort overzicht van enkele bestaande middelen voor (energiezuinige) warmteopwekking:

- HR-ketels;
- warmtekrachtkoppeling en HRe-ketels;
- warmtepompen en bodemenergie;
- zonne-energie.

### 1.2.1 HR-KETELS

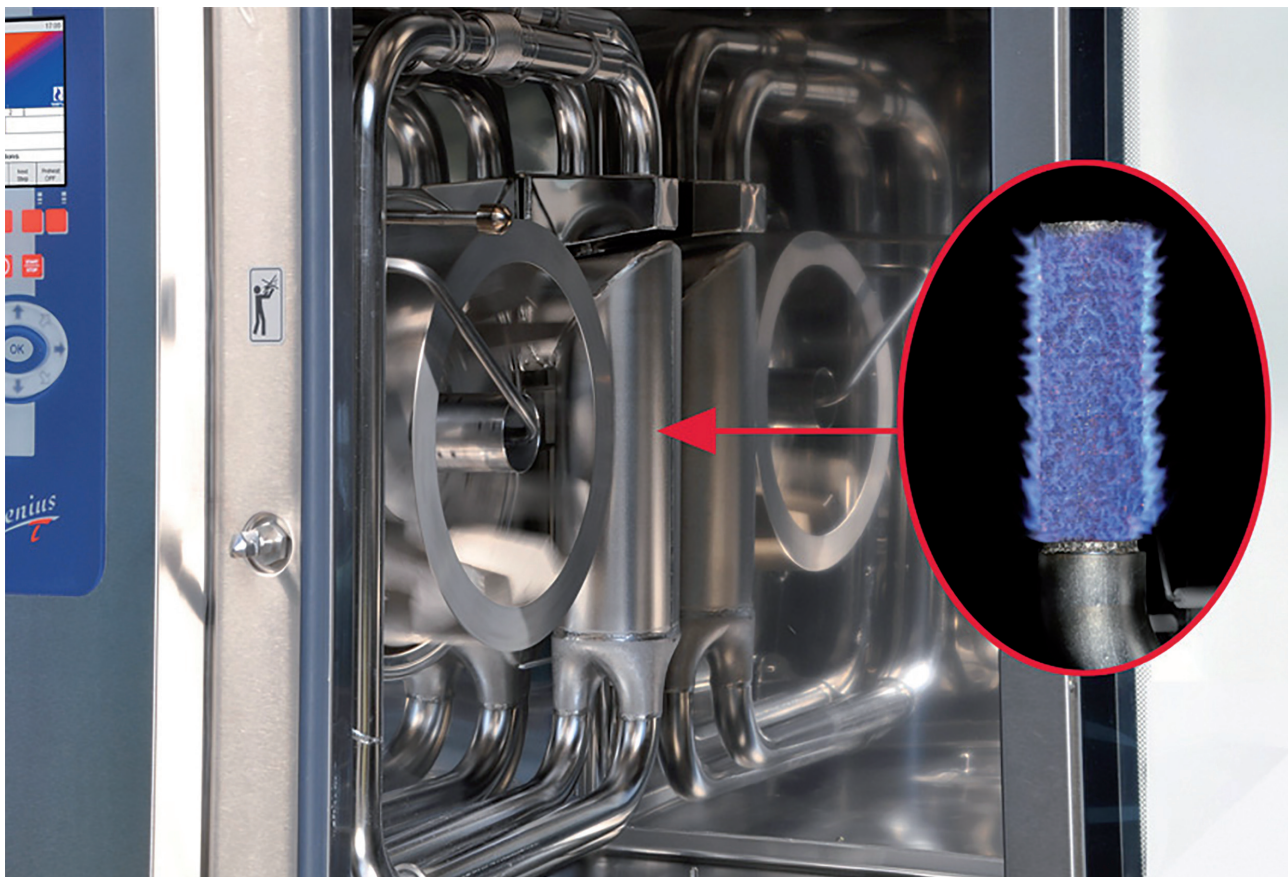
We passen intussen op grote schaal condenserende ketels, HR-ketels, toe om energie te besparen (zie afbeelding 1.5). De warmtewinst door condensatie bereiken we door de watertemperatuur te verlagen ten opzichte van de conventionele ketels. Conventionele ketels en installaties werden ontworpen op een aanvoer- en retourtemperatuur van 90/70 °C. Condensatie van de rookgassen bij gasgestookte ketels ontstaat pas bij een temperatuur lager dan  $\pm 56$  °C; zie ook hoofdstuk 6. Deze lage temperatuur kunnen we alleen bereiken door:

- verlaging van de ketelwatertemperatuur via een variabele stooklijn;
- een modulerende branderregeling;
- een variabel pompdebiet;
- een afgiftesysteem voor lage temperaturen, zoals vloerverwarming of grote radiatoren.

De HR-ketels worden vermeld met het rendement op onderwaarde, bijvoorbeeld HR 107. Deze onderwaarde is de verbrandingswaarde zonder de latente warmte die vrijkomt bij condensatie. Hierdoor wordt er als het ware meer warmte uit gehaald dan mogelijk is op onderwaarde. Het rendement stijgt zo tot boven de 100%. De nieuwste generatie HR-ketels haalt 109% op onderwaarde.

# HOOFDSTUK 2

## GASGESTOOKTE CV-KETELS



Aan cv-ketels voeren we energie toe met het doel warmte op te wekken en die vervolgens aan een vloeistof af te geven. Een cv-ketel bevindt zich altijd in een stromend leidingstelsel. Het afgekoelde retourwater komt met lage temperatuur aan en wordt vervolgens door de cv-ketel in temperatuur verhoogd tot de gewenste aanvoertemperatuur.

De meeste warmteopwekkingsinstallaties bestaan uit gasgestookte cv-ketels. Aardgas is bijna overal beschikbaar in Nederland. Dit zal in de toekomst veranderen, nu het aardgas onbetaalbaar dreigt te worden. Maar de komende 15 tot 20 jaar zal aardgas nog beschikbaar blijven. Hoe de situatie in de toekomst er uit ziet is moeilijk te voorspellen. In dit hoofdstuk (en in hoofdstuk 6) besteden we aandacht aan de gasgestookte cv-ketels.

In dit hoofdstuk behandelen we de volgende onderwerpen:

- cv-ketels indelen naar eigenschappen;
- compacte cv-ketels;
- middelgrote cv-ketels;
- grote overdruk-cv-ketels;
- heetwater- en stoomketels;
- rookgasafvoersystemen;
- jaarbelastingduurkromme.

## 2.1 CV-KETELS INDELEN NAAR EIGENSCHAPPEN

We kunnen cv-ketels indelen op basis van kenmerkende eigenschappen:

- medium en temperatuurbereik;
- risico-indeling;
- stookwijze;
- open of gesloten toestellen;
- energetische prestaties.

### 2.1.1 MEDIUM EN TEMPERATUURBEREIK

Het aan de cv-ketels toegevoerde water wordt verhit door temperatuuroptoe name:

- Warmwater: verhitten we in warmwaterketels tot een temperatuur van maximaal 110 °C, hoofdzakelijk voor het verwarmen van gebouwen (laagwaardige temperatuur). De gangbare aanvoertemperatuur varieert tussen 60 en 90 °C onder ontwerpcondities.
- Heetwater: passen we met een temperatuur boven 110 °C ook toe voor het verwarmen van gebouwen, maar vaker voor processen, in de praktijk meestal tot een temperatuur van circa 170 °C.
- Stoom: passen we toe bij grotere vermogens en hogere temperaturen, niet of nauwelijks voor het verwarmen van gebouwen, maar vooral om processen in industrieën of ziekenhuizen. Daar zetten we stoom in voor bijvoorbeeld bevochtiging, sterilisatie en het creëren van een vacuüm.
- Thermische olie: passen we toe voor processen met een nog hoger temperatuurbereik, 250 tot 400 °C. In de gebouwde omgeving komen dergelijke installaties niet voor en daarom zullen we ze niet verder behandelen.

### 2.1.2 RISICO-INDELING

Behalve naar temperatuur en druk kunnen we ketels ook indelen naar hun risico voor de omgeving. Het risico van het verstoken van brandstof, met name aardgas, behandelen we in hoofdstuk 6 'Verbrandingstechnieken'.

Internationaal gelden regels waaraan ketels moeten voldoen, naar gelang hun mediumtemperatuur en -druk en hun fasetoestand. Bijvoorbeeld ketels voor de productie van heetwater en stoom met een druk vanaf 0,5 bar overdruk zijn in principe keuringsplichtig en vallen onder de PED (*Pressure Equipment Directive*).

### 2.1.3 STOOKWIJZE

Ook de stookwijze kunnen we als indelingscriterium gebruiken. Aan ketels wordt energie toegevoerd en overgedragen. Deze energie kan bestaan uit:

- gasvormige brandstoffen;
- vloeibare brandstoffen;
- vaste brandstoffen;
- elektriciteit.

Als we ons beperken tot de situatie in Nederland en de opgestelde ketels voor de gebouwde omgeving, dan betreffen dit hoofdzakelijk aardgasgestookte ketels. Propaangestookte ketels passen we minder toe, wel in buitengebieden waar geen gasleiding ligt. Verder zijn er:

- ketels gestookt met huisbrandolie of biodiesel;
- houtgestookte ketels.

Daarnaast passen we elektrisch verwarmde ketels met kleinere vermogens toe, voor onder andere de productie van stoom voor bevochtigingsdoeleinden.

2.1.4 OPEN OF GESLOTEN TOESTELLEN

We kunnen ketels bovendien indelen naar de toevoer van de benodigde verbrandingslucht voor het toestel. Zo spreken we van een open toestel indien de verbrandingslucht aan de opstellingsruimte wordt onttrokken en van een gesloten toestel indien deze van buiten de opstellingsruimte wordt onttrokken. Verder kennen we atmosferische toestellen waarbij de verbrandingslucht onder atmosferische condities aan de brander wordt toegevoerd en overdrukkeketels waarbij de verbrandingslucht wordt aangezogen en onder druk wordt toegevoerd door middel van een verbrandingsluchtventilator.

2.1.5 ENERGETISCHE PRESTATIES

Ketels kunnen we ook indelen naar hun energetische prestaties. In tabel 2.1 staat een indeling op basis van het ketelrendement. De vermelde rendementen zijn bepaald op de betrokken *bovenwaarde* van de brandstof; zie ook subparagraaf 6.2.1. Subparagraaf 2.5.1 gaat verder in op de begrippen ‘economiser’ (cv-retourwatervoorverwarmer) en ‘luvo’ (luchtvoorverwarmer).

| Keteltype                | Aanvoer-temperatuur < 55 °C | Aanvoer-temperatuur > 55 °C | Economiser | Condensor | Luvo     |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|-----------|----------|
| Conventionele ketel      | 60-75%                      | 60-75%                      |            |           |          |
| VR (verbeterd rendement) | 75-80%                      | 75-80%                      |            |           |          |
| HR 100 (hoog rendement)  | 87,5-92,5%                  | 85-90%                      |            | Inclusief |          |
| HR 104 (hoog rendement)  | 90-95%                      | 87,5-92,5%                  |            | Inclusief |          |
| HR 107 (hoog rendement)  | 92,5-97,5%                  | 90-95%                      |            | Inclusief |          |
| Stoomketel               |                             | 81%                         | Extra 5%   | Extra 10% | Extra 5% |
| Heetwaterketel           |                             | 82%                         | Extra 5%   |           | Extra 5% |
| Elektrische ketel        | 40%                         |                             |            |           |          |

Tabel 2.1: Indeling van ketels naar energetische prestaties.

We zien dat de aanvoertemperatuur bij warmwaterketels van belang is, omdat rookgascondensatie optreedt bij rookgastemperaturen lager dan het dauwpunt. Voor aardgasgestookte toestellen is deze ongeveer 55 tot 60 °C afhankelijk van de luchtvermaat en atmosferische condities.

HR-ketels hebben een rookgascondensor en condenseren afhankelijk van de retourtemperatuur. Heetwaterketels kunnen zowel met economiser als met luvo worden uitgevoerd. Beide verhogen het rendement door de afkoeling van rookgassen. De rendementswinsten mogen dan bij elkaar gesommeerd worden. Dit geldt eveneens voor stoomketels: een rookgascondensor verhoogt de temperatuur van het koude suppletiewater.

2.2 COMPACTE CV-KETELS

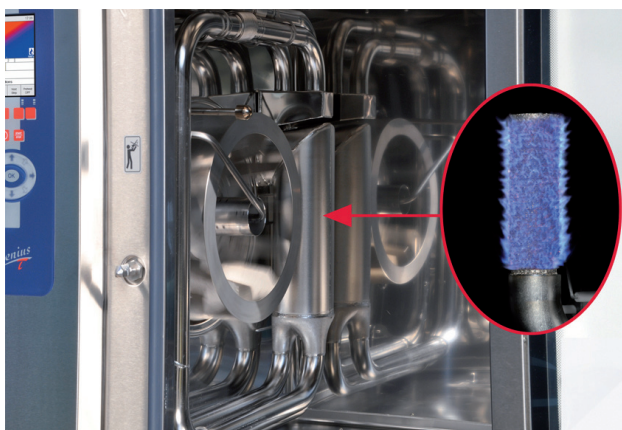
De compacte ketels die we met name toepassen in woonhuizen en kleine utiliteitsgebouwen, zijn op de markt beschikbaar als gaswandketel of staande ketel. Deze paragraaf gaat over compacte cv-ketels, daaropvolgende paragrafen gaan over middelgrote ketels en grote overdrukkeketels, die een andere bouw hebben.

### 2.2.1 EIGENSCHAPPEN VAN GASWANDKETELS TOT ONGEVEER 100 kW

In deze paragraaf komen de volgende onderwerpen aan bod:

- eigenschappen van gaswandketels tot ongeveer 100 kW;
- combi-cv-ketels;
- gaskeur;
- een voorbeeld van een cv-ketel;
- de cascadeopstelling.

De moderne warmwaterketels zijn compact gebouwd en kunnen tot een vermogen van ongeveer 100 kW uitgevoerd zijn als gaswandketel. Vrijwel alle wandketels zijn HR-ketels, waarbij de rookgassen condenseren. Condensatie wordt hierbij volledig benut als de retourtemperatuur daalt tot onder de 55 °C. Dit is bijvoorbeeld mogelijk bij vloerverwarming, grote radiatoren, weersafhankelijke regelingen en/of (met name bij de utiliteit) voorverwarming van ventilatielucht. Deze ketels zijn alle voorzien van een geïntegreerde premixbrander (zie afbeelding 2.1).



Afbeelding 2.1: Premixbrander van een HR-ketel.  
Bron: Eloma.

Een premixbrander bestaat uit een geperforeerde buis van gesinterd of hoogwaardig materiaal die talloze kleine vlammetjes produceert. Hij heeft een groot regelbereik en een lage NO<sub>x</sub>-uitstoot. Het hoge rendement berust op de frequentiegeregelde circulatiepomp, de verbrandingsluchtventilator en de lage ketelwatertemperatuur.

Door de optredende condensatie ontstaat rookgascondensaat. Vanwege het zure karakter hiervan, moet het worden afgevoerd naar het riool, terwijl de in aanraking komende delen van de ketel en de schoorsteen uitgevoerd moeten worden in aluminium of rvs. Vaak worden deze ketels uitgevoerd als combiketels, waarbij een ingebouwde, geïntegreerde warmtewisselaar zorgt voor warmtapwater.

De meeste cv-ketels tot ongeveer 40 kW hebben een Open Therm-aansluiting; zie subparagraaf 2.2.4. Via een modulerende thermostaat kan de ruimtetemperatuur ook modulerend geregeld worden, waardoor een beter stookgedrag ontstaat dan met een aan/uit-thermostaat. Bij een aan/uit-thermostaat wordt de regeling naar maximaal gestuurd en is er geen modulerend effect. De kleinere gaswandketels tot ongeveer 60 kW hebben een ingebouwde pomp, die vanaf 60 kW hebben meestal een externe pomp.

### 2.2.2 COMBI-CV-KETELS

Een vermogen van minimaal 24 kW is nodig om een redelijke warmwatervoorziening te kunnen realiseren. Wat betreft combi-cv-ketels groter dan 45 kW van het nominaal vermogen dient bij de warmtapwatervoorziening, zowel bij een platenwisselaar als bij een boiler, een dubbele scheiding aanwezig te zijn volgens de Waterwerkbladen (richtlijn bij de NEN 1006). Er zijn zes comfort- of tapwaterleveringsklassen gedefinieerd (zie afbeelding 2.2):

- CW1: levert tussen de 2 en 3 l warmwater van 60 °C/min, voldoende voor een keukenkraan;
- CW2: levert tussen de 3 en 4 l warmwater van 60 °C/min, voldoende voor een keukenkraan of douche;
- CW3: levert tussen de 5 en 6 l warmwater van 60 °C/min, voldoende voor een wastafel, keukenkraan of douche;

# HOOFDSTUK 4

## WARMTEPOMPEN EN WARMTE-KOUDE- OPSLAGSYSTEMEN



Warmtepompen gebruiken warmte van bijvoorbeeld buitenlucht, grondwater of de bodem. Ze verhogen deze warmte in temperatuur door er een klein deel energie aan toe te voegen. Hierdoor wordt veel energie bespaard en zijn de dure warmtepompen vaak goed terug te verdienen. Zowel op grote als kleine schaal worden warmtepompen meer en meer ingezet voor warmteopwekking in de gebouwde omgeving. Een bijzondere toepassing vormen de warmte-koudeopslagsystemen (wko's).

In dit hoofdstuk behandelen we:

- de werking van warmtepompen;
- carnotrendement, *COP*, *CPF* en *PER*;
- de uitvoeringsvormen van warmtepompen;
- de warmte-koudeopslagsystemen.

## 4.1 WERKING VAN WARMTEPOMPEN

In de jaren 1980 en 1990 werden warmtepompen nog beschouwd als een duur product met kinderziektes, nu zijn het algemeen toegepaste apparaten voor warmte- en/of koudeopwekking. Ze worden veel toegepast in met name utiliteitsgebouwen, maar ook in steeds meer woningen. Deze paragraaf gaat over:

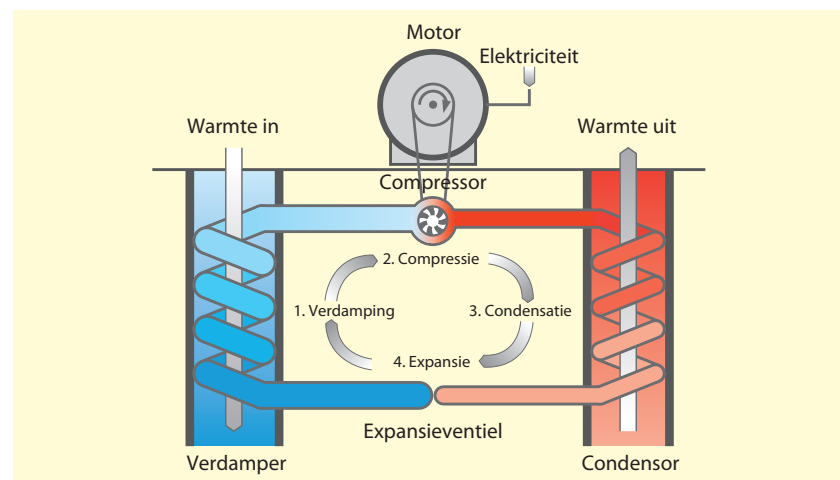
- elektrische compressiewarmtepompen
- energie versus exergie.

### 4.1.1 ELEKTRISCHE COMPRESSIE-WARMTEPOMPEN

We leggen de werking van warmtepompen uit aan de hand van een elektrische compressiewarmtepomp. Eigenlijk werkt deze zoals een koelmachine, maar dan met een omkeerbaar arbeidsproces. Het is een apparaat dat warmte van een onbruikbaar naar een bruikbaar temperatuurniveau brengt door energie (gas of elektriciteit) toe te voegen.

Niet toevallig bestaat de compressiewarmtepomp uit dezelfde onderdelen als een koelmachine:

- een warmtewisselaar;
- een compressor/verdampers;
- een condensor;
- een expansieventiel (zie afbeelding 4.1).



Afbeelding 4.1: Processchema van een warmtepomp. Bron: Radson.

De compressiewarmtepomp onttrekt warmte aan de omgeving:

- de buitenlucht;
- de retour-/afvoerlucht;
- het oppervlaktewater;
- het grondwater;
- de bodem.

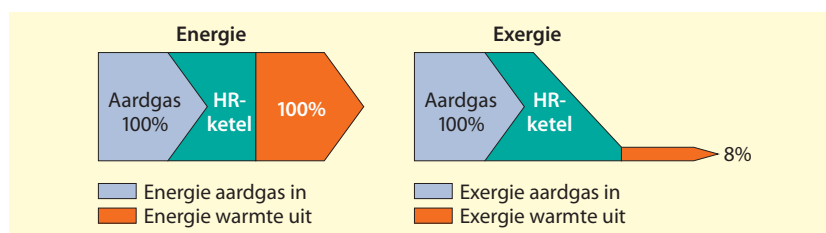
Deze natuurlijke energie wordt naar de verdampers gevoerd om daar het vloeibare koude-middel te verdampen onder afgifte van warmte. Vervolgens wordt het zo gevormde gas door de compressor aangezogen en samengeperst, waarbij de druk en temperatuur ervan worden verhoogd. In de condensor wordt de warmte afgestaan aan het verwarmingssysteem.

### 4.1.2 ENERGIE VERSUS EXERGIE

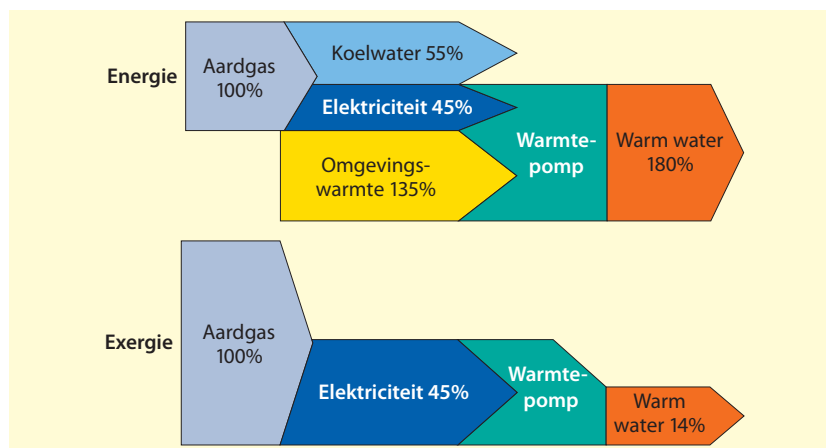
Het gas condenseert daarbij tot vloeistof. Die vloeistof wordt in druk verlaagd via het expansieventiel. Onder invloed van een temperatuurstoename in de verdamper wordt de vloeistof weer in gas veranderd. Hiermee is de cyclus voltooid en zal de compressor dit gas opnieuw in druk en temperatuur laten toenemen.

Bij het begrip 'exergie' gaat het om de kwaliteit van energie, gebaseerd op een temperatuurverschil. In een HR-ketel ontstaan bij verbranding van aardgas temperaturen van enkele honderden graden, terwijl een lage temperatuur van bijvoorbeeld 60 °C gevraagd wordt. Er gaat geen energie verloren door de zeer hoge rendementen, maar wel veel exergie (zie afbeelding 4.2). Met een warmtepomp worden temperaturen van een laag niveau, zoals bodemwarmte, verhoogd tot een bruikbaar niveau door toevoeging van een deel elektrische energie (zie afbeelding 4.3).

Afbeelding 4.2: Exergie van een HR-ketel.  
Bron: [www.cocos.nl](http://www.cocos.nl).



Afbeelding 4.3: Exergie van een warmtepomp.  
Bron: [www.cocos.nl](http://www.cocos.nl).



Met het begrip 'exergie' maken we duidelijk waar energieverstopping optreedt. Door verbranding van aardgas op hoge temperaturen zou je meer kunnen doen dan alleen een woning verwarmen. Dit geeft dus de kwaliteit van de energie weer. Op aardgas zou je bijvoorbeeld ook een motor kunnen laten draaien, terwijl dat niet kan met bodemwarmte.

## 4.2 CARNOTRENDEMENT, COP, SPF EN PER

Deze paragraaf gaat over de prestatie van warmtepompen vergeleken met die van een HR-ketel. We behandelen:

- het carnotrendement;
- de *coefficient of performance* (COP);
- de *seasonal performance factor* (SPF);
- een vergelijking van de warmte van een warmtepomp en een HR-ketel, met aandacht voor de *primary energy ratio* (PER).

### 4.2.1 CARNOTRENDEMENT

Het theoretisch maximale rendement van een warmtepomp kan worden beschreven met het Carnotrendement.

Dit rendement wordt als volgt beschreven:

$$COP_h \cdot \text{Carnot} = \frac{T_{\text{cond}} \text{ (K)}}{T_{\text{cond}} - T_{\text{verd}}}$$

In de vergelijking is te zien dat het Carnotrendement afhankelijk is van de condensatie en verdampingstemperatuur, deze worden in absolute temperatuur weergegeven (K).