

# **OVERZICHT COMMERCIEEL VERKRIJGBARE WARMTEWISSELAARS**

## **Technische en economische kentallen**

S.F. Smeding

| Revisies                                                           |                    |                     |                       |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| [A]                                                                | Definitieve versie |                     | 6 juli 2001           |
| [B]                                                                |                    |                     |                       |
| Gemaakt door:                                                      |                    | Gecontroleerd door: | Vrijgegeven door:     |
| S.F. Smeding                                                       |                    | PL: W.G. Haije      | UM: P.T. Alderliesten |
| ECN Energie Efficiency<br>in de Industrie<br>Restwarmtetechnologie |                    |                     |                       |

## Verantwoording

Het in dit rapport beschreven onderzoek is uitgevoerd binnen het basissubsidieprogramma van het ECN prioriteitsgebied Energie Efficiency in de Industrie, speerpunt Restwarmtetechnologie, onder ECN projectnummer 7.6430.

## Abstract

When developing equipment for waste heat manipulation, it is necessary to have full understanding of heat transfer and also of the equipment involved. Making an inventory of all types of heat exchangers solves the present lack of knowledge of design data and economic parameters of heat exchangers. This survey made use of the open literature, the Internet and pamphlets of companies.

For the selection of heat exchangers in a specific application the most important criteria are: compactness ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ); the overall heat transfer coefficient ( $U$ ,  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ), range of temperature, pressure and power, fouling, price and experience.

Plate heat exchangers are compact, efficient and not expensive in comparison with conventional Shell and Tube type heat exchanger and are gaining importance. There are many types of plate heat exchangers. The main classes are: frame-, brazed-, welded- and spiral plate heat exchangers.

The use of fins, grooved surfaces, inserts and twisted tubes give good prospects of improving the overall heat transfer.

## Keywords

Restwarmte, warmteoverdracht, compacte warmtewisselaar, Shell and Tube, platenwarmtewisselaar, warmteoverdrachtscoëfficiënt, enhanced heattransfer, kosten, vervuiling, drukval, chemische reactie.

# INHOUD

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| SAMENVATTING                                    | 5  |
| 1. INLEIDING                                    | 7  |
| 2. CLASSIFICATIE                                | 9  |
| 2.1 Overdrachtsproces                           | 9  |
| 2.2 Constructie warmtewisselaar                 | 10 |
| 2.3 Stromingsordening                           | 10 |
| 2.4 Overdrachtsmechanisme                       | 11 |
| 2.5 Procesfunctie                               | 11 |
| 3. VERGELIJKING KENTALLEN                       | 13 |
| 3.1 Inleiding                                   | 13 |
| 3.2 Definities                                  | 13 |
| 3.3 Kentallen                                   | 14 |
| 3.3.1 Compactheid                               | 14 |
| 3.3.2 Warmteoverdrachtscoëfficiënt              | 15 |
| 3.3.3 Indicatie kosten                          | 16 |
| 4. PLATEN WARMTEWISSELAAR                       | 19 |
| 4.1 Inleiding                                   | 19 |
| 4.2 Beschrijving                                | 19 |
| 4.3 Prestatielimieten                           | 20 |
| 4.4 Uitvoeringen                                | 21 |
| 4.4.1 Plaat & frame warmtewisselaar (PFHE)      | 21 |
| 4.4.2 Gesoldeerde platen warmtewisselaar (BPHE) | 24 |
| 4.4.3 Gelaste platen warmtewisselaar (WPHE)     | 25 |
| 4.4.4 Spiraal plaat warmtewisselaars (SHE)      | 25 |
| 4.4.5 Plaat-vin warmtewisselaar (PFHE)          | 26 |
| 4.4.6 Geprint circuit warmtewisselaar (PCHE)    | 28 |
| 4.4.7 Poreuze matrix warmtewisselaar (PMHE)     | 29 |
| 4.4.8 Overige typen (platen)warmtewisselaars    | 30 |
| 4.5 Ontwerp                                     | 30 |
| 4.6 Prijs                                       | 31 |
| 5. ‘SHELL & TUBE’ WARMTEWISSELAARS              | 33 |
| 5.1 Prestatie limieten                          | 33 |
| 5.2 Uitvoeringsvormen                           | 34 |
| 5.2.1 Compacte ‘Shell & Tube’ warmtewisselaar   | 35 |
| 5.2.2 ‘Plate & Shell’ warmtewisselaar (PSHE)    | 35 |
| 5.3 Prijs                                       | 37 |
| 6. OVERIGE TYPEN WARMTEWISSELAARS               | 39 |
| 6.1 Heat pipe warmtewisselaar (HPHE)            | 39 |
| 6.2 Concentrische buis warmtewisselaar          | 40 |
| 6.3 Radiator warmtewisselaar/plaat ‘coil’       | 41 |
| 6.4 (Mini) spiraal warmtewisselaar              | 41 |
| 6.5 Grafiet kubus/cilinder blok warmtewisselaar | 42 |
| 6.6 Micro warmtewisselaar                       | 42 |
| 7. VERBETERING WARMTEOVERDRACHT                 | 45 |
| 7.1 Gevinde buizen                              | 45 |
| 7.2 Modificatie stroming in buis                | 47 |
| 7.3 Gemodificeerde keerschotten                 | 47 |
| 8. SELECTIE TYPE WARMTEWISSELAAR                | 49 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| REFERENTIES           | 51 |
| LIJST VAN AFKORTINGEN | 53 |
| BIJLAGE A BEDRIJVEN   | 55 |
| BIJLAGE B SOFTWARE    | 59 |
| BIJLAGE C FORMULES    | 61 |

## SAMENVATTING

Warmtewisseling is een noodzakelijk en limiterend proces binnen het onderzoek naar het ontwikkelen van apparatuur voor het benutten van restwarmte. Binnen de werkeenheid Restwarmtetechnologie bestaat behoefte aan een nadere uitwerking van kentallen voor selectie en het ontwerp van warmtewisselaars. Na de keuze van een indeling van warmtewisselaars naar constructie, is het grote aanbod van type en merken gestructureerd. In eerste instantie worden de warmtewisselaars vergeleken op compactheid (is verhouding warmtewisselend oppervlak-volume apparaat), op de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt  $U$  en de kapitaalkosten. De plaat warmtewisselaar ( $150\text{-}250\text{ m}^2/\text{m}^3$ ) is enigszins compacter in vergelijking met een traditionele 'Shell & Tube' warmtewisselaar ( $50\text{-}200\text{ m}^2/\text{m}^3$ ). Er bestaan nog aanzienlijk compactere typen warmtewisselaars (tot  $50.000\text{ m}^2/\text{m}^3$ ). De  $U$  van een platenwarmtewisselaar ligt tot een factor vijf hoger dan van een 'Shell & Tube' warmtewisselaar, zodat de prestatiedichtheid (product van compactheid en  $U$ ) van platenwarmtewisselaars meer dan een factor vijf hoger ligt dan van traditionele 'Shell & Tube' warmtewisselaars.

Van platenwarmtewisselaars bestaan een groot aantal uitvoeringen. De bekendste typen zijn de frame-, de gesoldeerde-, de gelaste- en de spiraal-platen warmtewisselaar. Hiernaast vallen ook de plaat-vin en de geprint circuit warmtewisselaar onder deze categorie van compacte warmtewisselaars. De apparaten hebben minder last van vervuiling dan 'Shell & Tube' door de gelijkmatige stroming. Frame- en spiraal-plaat warmtewisselaars zijn goed mechanisch te reinigen. Alle overige platenwarmtewisselaars zijn goed chemisch te reinigen. Door de hogere  $U$ -waarde bedragen de kapitaalkosten van standaard frame-plaat warmtewisselaars ongeveer 25% van een 'Shell & Tube' warmtewisselaar. De 'Plate & Shell' en de gelaste plaat warmtewisselaar zijn vergelijkbaar in prijs met 'Shell & Tube'. De geavanceerde 'printed circuit' warmtewisselaars zijn bijna drie keer duurder dan 'Shell & Tube'. Door de veel kleinere afmetingen liggen de installatie- en onderhoudskosten ongeveer de helft lager dan van 'Shell & Tube'. In totaliteit is vrijwel altijd een financiële besparing mogelijk.

Naast de traditionele volumineuze 'Shell & Tube' warmtewisselaars, bestaan van dit type ook compacte constructies, gerealiseerd door het gebruik bundelpijpen gemaakt van veel kleinere diameter buizen ( $\pm 3\text{ mm}$ ) of door de buizen in de mantel te vervangen door gestapelde platen.

Naast de twee hoofdtypen bestaan er nog een keur aan overige constructies. Beschreven worden de heat pipe warmtewisselaar voor regeneratieve systemen, de concentrische buis warmtewisselaar, de radiator of plaat-coil en de spiraal warmtewisselaar. In opkomst zijn de micro warmtewisselaars. Dit zijn zeer compacte warmtewisselaar ( $>10.000\text{ m}^2/\text{m}^3$ ) eventueel tevens geschikt als reactor.

Naast het toepassen van vinnen is het gebruik van gegroefde of getordeerde buizen en 'inserts' een methode om de warmteoverdracht verder te verbeteren. Naast het streven naar compacte apparaten is het doel om de relatieve drukval (de verhouding drukval-overgedragen warmte) te beperken.

De selectiecriteria voor warmtewisselaars zijn:

1. Temperatuur
2. Druk
3. Drukval
4. Vervuiling
5. Vermogen
6. Kosten
7. Ervaring
8. Compactheid

Aan de hand van deze criteria is een tabel met de belangrijkste kentallen opgesteld en is het mogelijk om voor een gegeven warmteoverdracht probleem een keuze te maken van de in aanmerking komende warmtewisselaars.

## 1. INLEIDING

Warmtewisselaars zijn belangrijke componenten in industriële processen. Met name voor energiebesparing en warmteterugwinning zijn het noodzakelijke apparaten. Binnen de groep Restwarmtetechnologie komt warmte-uitwisseling in vrijwel alle projecten naar voren. Een volledig overzicht van type warmtewisselaars, totale warmteoverdracht coëfficiënten, kosten en selectiecriteria is niet beschikbaar. Om deze reden is een inventarisatie van deze kentallen gewenst.

Gekozen is om met behulp van de beschikbare literatuur de technische en economische kentallen van warmtewisselaars te verzamelen en te schikken. Begonnen is om de verschillende classificaties die gebruikelijk en mogelijk zijn te beschrijven (Hoofdstuk 2). Om een representatieve vergelijking mogelijk te maken en een goed te begrip te hebben van de kentallen voor warmtewisselaars worden in Hoofdstuk 3 gestart met het definiëren van de belangrijkste begrippen van de warmteoverdracht technologie. Vooruitlopend op de kentallen per type warmtewisselaar, worden de hoofdtypen warmtewisselaars op een beperkt aantal selectiecriteria onderling vergeleken in diverse figuren.

Vervolgens is in de Hoofdstukken 4 tot en met 6 per type warmtewisselaar (gerangschikt op constructie) de technologie besproken, worden de voor- en nadelen beschreven en de belangrijkste kentallen in tabellen en figuren weergegeven. Om een bestaand warmtewisselaar ontwerp te verbeteren zijn in Hoofdstuk 7 een aantal opties beschreven. Het rapport wordt afgesloten met overzicht van kentallen om tot een selectie van een warmtewisselaar te komen.

Het rapport telt een drietal bijlagen welke een lijst van de belangrijkste leveranciers en onderzoeksinstituten van warmtewisselaars geeft. Hiernaast worden voor de belangrijkste type warmtewisselaars relaties en formules voor het ontwerpberekeningen beschreven.





## 2. CLASSIFICATIE

In de literatuur worden warmtewisselaars veelal naar technologie of constructie ingedeeld. Echter voor selectie van of berekeningen aan warmtewisselaars hebben mogelijk andere indelingen de voorkeur. Mogelijke rangschikkingen zijn:

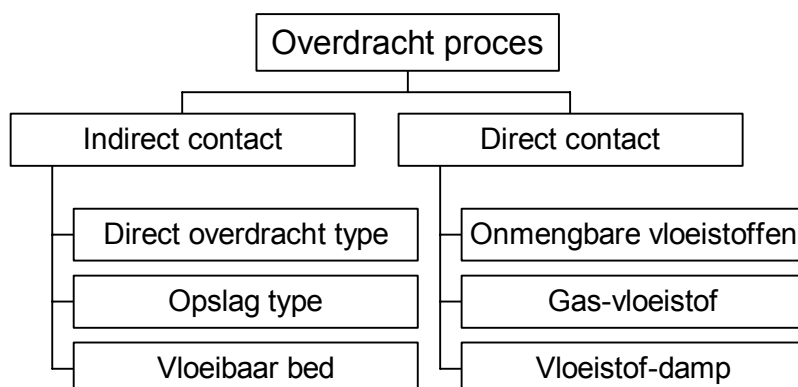
1. overdrachtsproces,
2. aantal stromen,
3. compactheid oppervlak<sup>1</sup>,
4. constructie,
5. stroom rangschikking/ordening,
6. overdracht mechanisme,
7. procesfunctie.

Uitgezonderd de punten twee en drie worden in de schema's de classificatie verder uitgewerkt en eventueel toegelicht.

### 2.1 Overdrachtsproces

Voor de meeste warmteoverdrachtsprocessen is het noodzakelijk de stromen te scheiden (indirect contact). Redenen hiervoor zijn verschillende drukken (drukscheiding), verschillend kwaliteit niveau (verschil in temperatuurgebied) of verschillende media. Is dit niet noodzakelijk, dan kan warmte veelal beter via direct contact worden uitgewisseld. Vrijwel alle type warmtewisselaars in dit rapport zijn van het type 'directe overdracht'. Bij het opslag type warmtewisselaars stromen afwisselend beide stromen door hetzelfde kanaal. De warmte wordt tijdelijk opgeslagen in een cel structuur of in de wand. Een voorbeeld van dit type, ook wel regenerator genoemd, is een warmtewiel. Het gaat hierbij vrijwel altijd om gas-gas warmte uitwisseling. Een vloeibaar bed warmtewisselaar maakt gebruik van vast materiaal (b.v. zand) als tussenmedium. Een pijpenbundel met vloeistof door het zandbed warmt het tussenmedium op. Een gas wordt door het zandbed geblazen die de warmte door het intensieve hiermee goed opneemt.

Vaste-stof-damp systemen worden niet apart onderscheiden. Zij kunnen worden beschouwd als warmteoverdracht tussen een stilstaand en stromend medium.



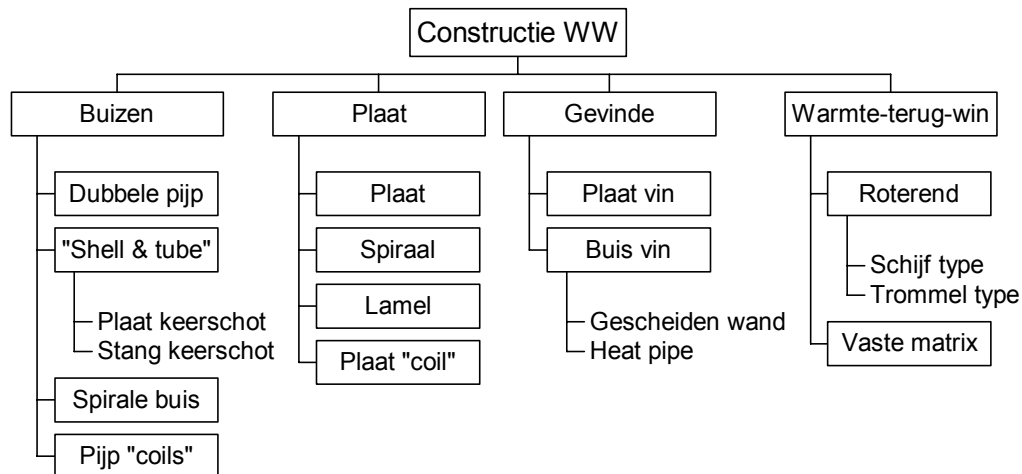
Figuur 2.1 *Classificatie warmtewisselaars naar overdrachtsproces*

---

<sup>1</sup> Zie Figuur 3.1 en Figuur 3.3

## 2.2 Constructie warmtewisselaar

Uitgezonderd 'Warmte-terug-win' warmtewisselaars worden de in het schema genoemde typen beschreven in Hoofdstuk 4 (platen); Hoofdstuk 5 ('shell & tube'); Hoofdstuk 6 (o.a. warmte pijp of heat pipe) en Hoofdstuk 7 (gevinde buizen). De beschrijving van de diverse warmtewisselaars in dit rapport vindt dus niet plaats op de eerste onderverdeling (buizen; plaat; gevinde; warmte-terug-win), maar op het niveau hieronder.

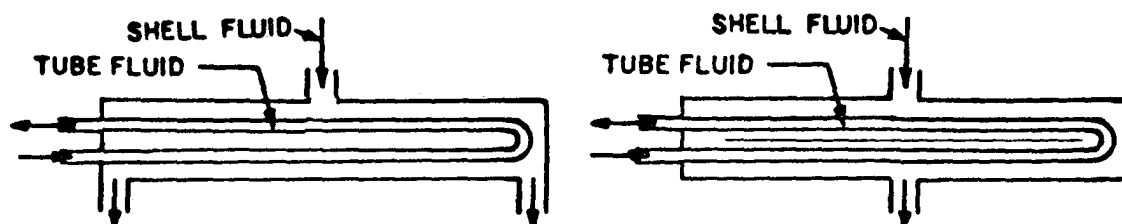


Figuur 2.2 *Classificatie warmtewisselaars naar constructie warmtewisselaar*

Plaat 'coils' zijn radiator-vormige panelen. In twee platen die zijn samengeperst of gelast zijn buisvormige kanalen geperst.

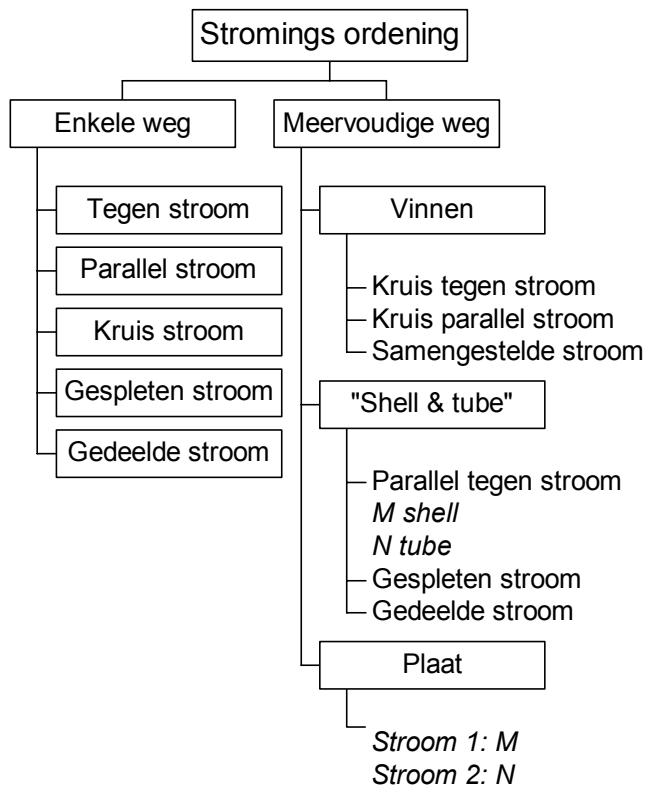
## 2.3 Stromingsordening

Een stroom wordt beschouwd als een enkele weg indien de volledige stroom over de lengte van de warmtewisselaar niet afgesplitst of afgetakt wordt. De tegenstroom configuratie is het meest efficiënt, de meestroom het minst.



Figuur 2.3 *Gedeelde stroom warmtewisselaar (links) en gespleten stroom warmtewisselaar (rechts)*

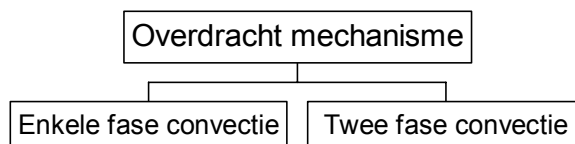
In een gedeelde stroom warmtewisselaar wordt de stroom halverwege de buis aangevoerd en gesplitst, waarna een gedeelte van het medium zich in mee stroom en een gedeelte in tegen stroom bevindt. Een gespleten stroom is vergelijkbaar met een gedeelde stroom. Alleen keren de stromen aan de uiteinden van de warmtewisselaar weer om en komen in het centrum weer bij elkaar. De meervoudige weg warmtewisselaars worden eerst onderverdeeld in de constructie typen, waaronder weer een groot aantal mogelijke variaties bestaat.



Figuur 2.4 *Classificatie warmtewisselaars naar stromingsordening*

## 2.4 Overdrachtsmechanisme

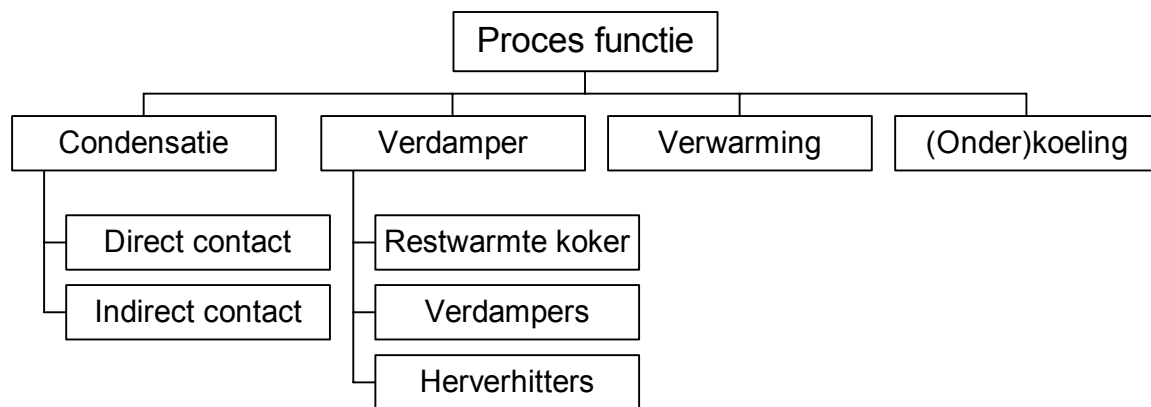
Bij het overdrachtsmechanisme wordt enkel onderscheid gemaakt of er wel of geen fase-overgang plaats vindt. In een twee fase convectie vindt verdamping of condensatie van een medium plaats.



Figuur 2.5 *Classificatie warmtewisselaars naar overdrachtsmechanisme*

## 2.5 Procesfunctie

Classificatie naar de functie van een warmtewisselaar levert een viertal hoofdvertakkingen op. Condensatie en verdamping in geval van een fase-overgang. Koelen en verwarmen indien alleen van voelbare warmte sprake is.



Figuur 2.6 *Classificatie warmtewisselaars naar procesfunctie*

### 3. VERGELIJKING KENTALLEN

#### 3.1 Inleiding

Om warmtewisselaars goed onderling te kunnen vergelijken, is het noodzaak een goed begrip van de beoordelingscriteria te hebben. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste prestaties en kenmerken van de warmtewisselaars gedefinieerd en vergeleken met behulp van tabellen en figuren. In de hierna volgende hoofdstukken wordt per type warmtewisselaar meer op details ingegaan. In Hoofdstuk 8 worden de diverse kentallen per type warmtewisselaar samengevat waarmee het mogelijk wordt voor een specifieke toepassing een lijst met warmtewisselaar te filteren die aan de eisen voldoet.

#### 3.2 Definities

|                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Compactheid</i>                           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. De verhouding van het warmtewisselend oppervlak en het totale volume van de warmtewisselaar (<math>\text{m}^2/\text{m}^3</math>)</li> <li>2. De verhouding van het warmtewisselend oppervlak en het totale gewicht van de warmtewisselaar (<math>\text{m}^2/\text{kg}</math>)</li> <li>3. De verhouding tussen thermisch vermogen en het totale volume van de warmtewisselaar 2 (<math>\text{W}/\text{m}^3</math>)</li> </ol> |
| <i>Effectiviteit</i>                         | <p>Verhouding van het werkelijke overgedragen vermogen en het maximaal theoretisch mogelijk over te dragen vermogen.</p> $\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{C_h (T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{uit}})}{C_{\min} (T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})} = \frac{C_c (T_{c,\text{uit}} - T_{c,\text{in}})}{C_{\min} (T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})}$                                                                                                             |
| <i>Hydraulische diameter</i>                 | <p>Effectieve diameter voor niet ronde buizen = verhouding (4 x dwarsoppervlak) en omtrek (m)</p> $d_h = 4 \frac{\text{dwarsoppervlak}}{\text{omtrek}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <i>Prandtl</i>                               | <p>Dimensieloos getal voor de verhouding van het moment en de thermische diffusie:</p> $\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <i>Prestatie</i>                             | <p>De verhouding van het overgedragen vermogen en het product van het totale volume van de warmtewisselaar met het temperatuurverschil tussen het primaire en secundaire medium (<math>\text{W}/\text{m}^3 \text{ K}</math>)</p> $\text{Prestatie} = \frac{\text{thermisch vermogen}}{\text{volume} \cdot (\bar{T}_{\text{primair}} - \bar{T}_{\text{secundair}})}$                                                                                                     |
| <i>Totale warmteoverdracht coëfficiënt U</i> | <p>Totaal van warmteoverdracht weerstanden ten gevolge van convectie aan binnen- en buitenzijde; geleiding door wand; contactweerstand en vervuilingweerstand<sup>3</sup> <math>R_f</math> (<math>\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}</math>)</p> $\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_h} + \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c} + R_f$                                                                                                                                           |

2 (Bailey 1999)

3 Een typische waarde voor  $R_f=0,00018 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$  voor shell-tube en  $R_f=0,000018 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$  voor platen WW (Bailey 1999)

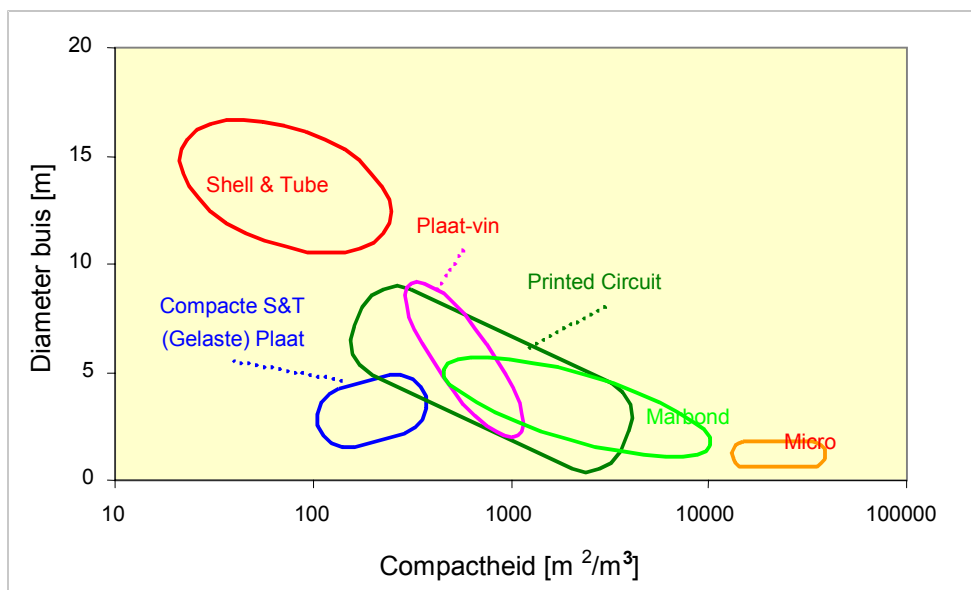
|                                                              |                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Verwarmd oppervlak VO</i>                                 | Het oppervlak van de warmtewisselaar dat bijdraagt aan de warmteoverdracht                                                |
| <i>Warmteoverdracht coëfficiënt alfa <math>\alpha</math></i> | Lokale warmteoverdracht coëfficiënt ten gevolge van convectie ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$ )                         |
| <i>Warmtestroom</i>                                          | Product van soortelijke warmte ( $\text{J}/\text{kg K}$ ) en massastroom ( $\text{kg}/\text{s}$ ) ( $\text{W}/\text{K}$ ) |

### 3.3 Kentallen

In een beperkt aantal figuren en een totaal tabel worden belangrijke selectiecriteria voor warmtewisselaars weergegeven. Met name worden vergeleken de compactheid, de warmteoverdracht en de kosten van diverse typen warmtewisselaars.

#### 3.3.1 Compactheid

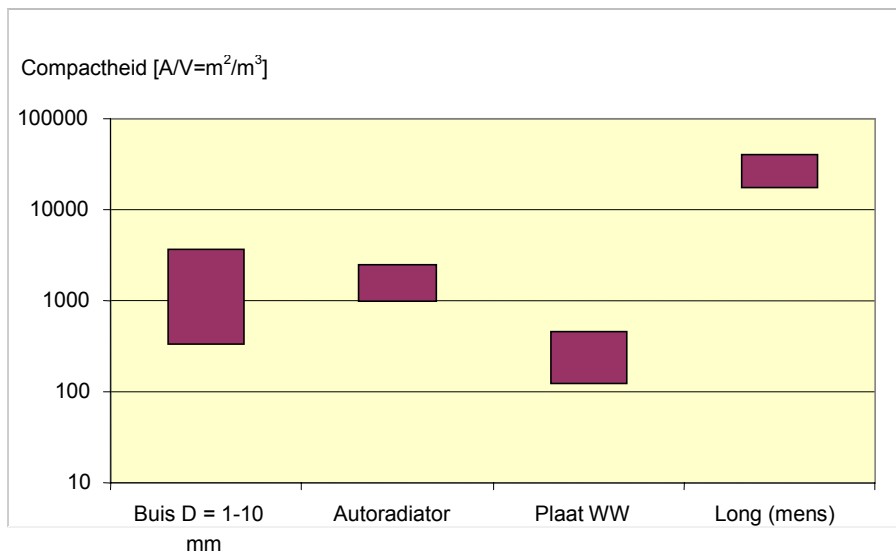
Van een compacte warmtewisselaar is sprake indien de verhouding warmtewisselend oppervlak–volume (compactheid) groter is dan  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  voor gasstromen en  $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$  voor vloeistofstromen. De trend is het verder zoeken naar compacte warmtewisselaars. Om deze reden worden de buizenbundels steeds vaker vervangen door platenwarmtewisselaars. Maar ook de platen warmtewisselaar is lang niet het meest compacte type warmtewisselaar. Met micro warmtewisselaars is het mogelijk waarden te halen tot  $15000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (Figuur 3.1). In Figuur 3.3 blijkt dat de compactheid mogelijk nog sterk kan stijgen. Als de menselijke long als ideaal wordt beschouwd, kan het ontwerp nog verder verbeterd worden. Kanttekening is wel dat bij een kleine hydraulische diameter de drukval hoog is.



Figuur 3.1 *Relatie compactheid en (hydraulische) buisdiameter van een warmtewisselaar* (Reay 1999)



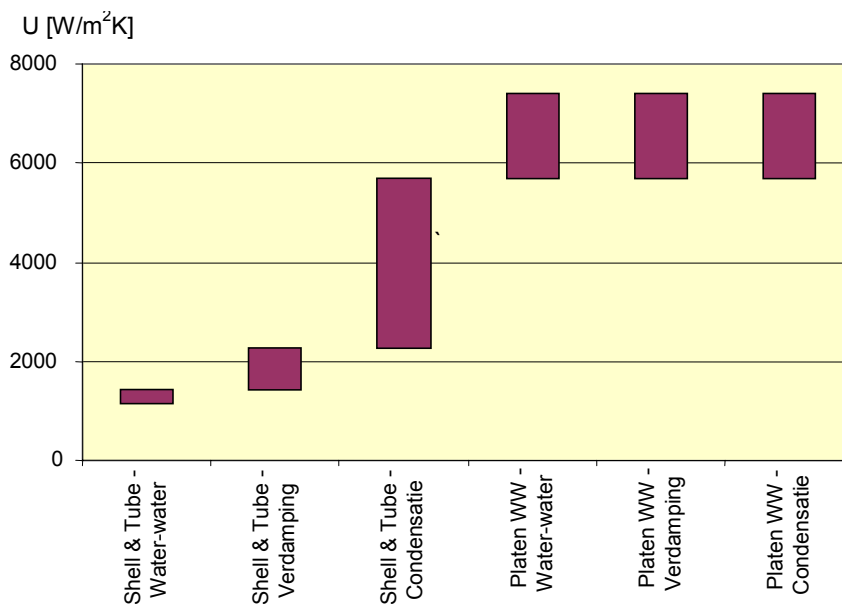
Figuur 3.2 Een platen warmtewisselaar en een 'Shell & Tube' warmtewisselaar met een vergelijkbaar thermisch vermogen



Figuur 3.3 De compactheid van een drietal warmtewisselaars. De autoradiator is een voorbeeld van een plaat-vin warmtewisselaar. De long van een mens is alleen weergegeven om te vergelijken met de compactheid en is geen warmtewisselaar (Shah 1997)

### 3.3.2 Warmteoverdrachtscoëfficiënt

De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt  $U$  van een warmtewisselaar bestaat uit de som van warmteweerstand. Indien de vervuiling beperkt is en er sprake is van een dunwandig en goed geleidend metaal bestaat  $U$  alleen uit de convectie van het primaire en secundaire medium naar de wand. Hierop zijn met name de stroomsnelheid (laminair of turbulent); de stoffeigenschappen (viscositeit en Prandtl-getal) en geometrie van het stromingsprofiel van invloed.

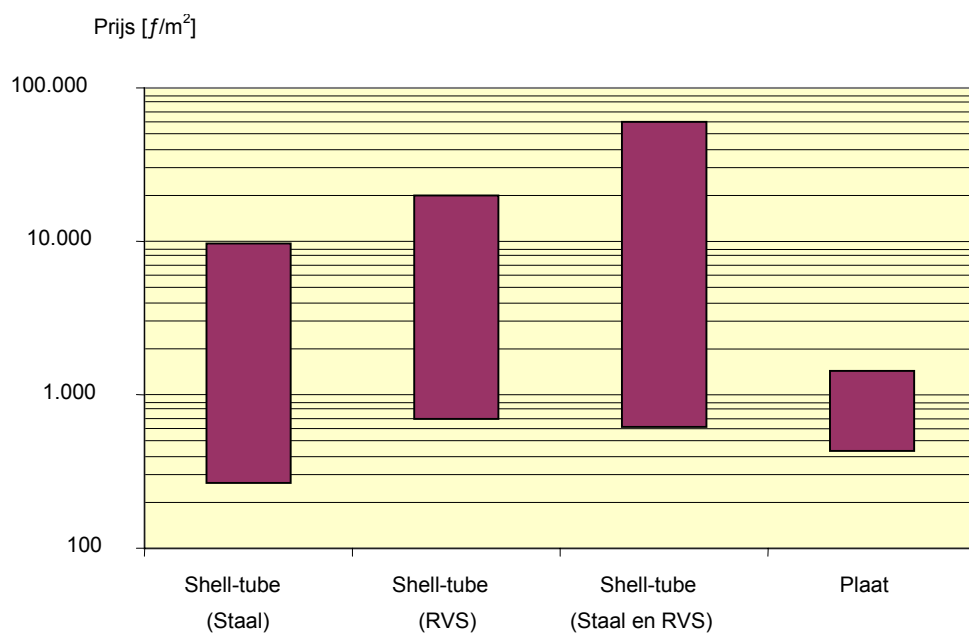


Figuur 3.4 *De prestatie van een warmtewisselaar hangt niet alleen van het type af, maar tevens van het warmteoverdrachtsmechanisme. De overall warmteoverdrachtscoëfficiënt U van een pijpenbundel ligt voor verdamping en met name condensatie veel hoger dan voor een één fase systeem (water-water). Voor een platen warmtewisselaar is dit verschil veel kleiner*

### 3.3.3 Indicatie kosten

De kapitaal kosten van warmtewisselaars zijn het beste onderling te vergelijken indien de prijs dimensieloos is gemaakt voor het warmtewisselend oppervlak en de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt U. In de literatuur worden echter alleen bedragen gevonden per oppervlakte-eenheid. De prijzen variëren hiernaast sterk per type; keuze materialen en schaalgrootte. Een plaat warmtewisselaar is per oppervlakte-eenheid gemiddeld goedkoper dan een 'Shell & Tube' warmtewisselaar. Per type warmtewisselaar worden nog meer details beschreven.





Figuur 3.5 *Indicatie minimale en maximale prijzen per oppervlakte van een tweetal typen warmtewisselaars in diverse materialen (DACE 1999)*



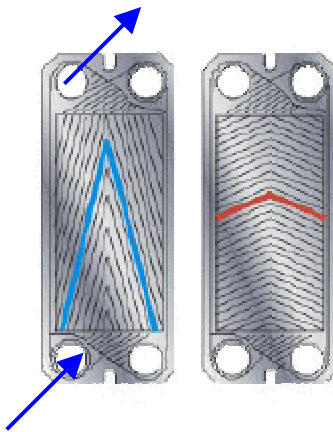
## 4. PLATEN WARMTEWISSELAAR

### 4.1 Inleiding

De platen warmtewisselaar (PHE) ontwikkeld in 1923 is het bekendste type compacte warmtewisselaar. Toepassing van platen warmtewisselaars lagen in het verleden hoofdzakelijk in de voedingsindustrie. Vervuiling die optrad kon eenvoudig schoon gemaakt worden door de platen te ontmantelen. Maar ook de hoge warmteoverdracht, de korte verblijftijd en de beperkte spreiding in verblijftijd zijn andere voordelen. Met de ontwikkeling van grotere platen kwamen ook toepassingen in de chemische industrie, raffinage, stadsverwarming en elektriciteitsproductie in beeld. Naast warmteoverdracht zonder fase overgang, is ook condensatie en verdamping mogelijk in een platen warmtewisselaar.

### 4.2 Beschrijving

Een platen warmtewisselaar bestaat uit een serie op elkaar gestapelde platen. In elke plaat is een stromingspatroon geperst met een viertal doorvoeringen op de hoeken. Tussen twee gestapelde platen ontstaan stromingspatronen waartussen een medium kan stromen. Om en om stroomt het primaire en secundaire medium tussen twee platen. Intrede en uittrede van een medium vinden altijd plaats aan dezelfde lange zijde van een plaat. Het is mogelijk van slechts één type plaat gebruik te maken, door de platen afwisselend  $180^\circ$  horizontaal gedraaid en op z'n kop (verticaal  $180^\circ$  gedraaid). Lekkage tussen de platen wordt voorkomen door gebruik te maken van pakkingen (plaat-frame warmtewisselaar). De verblijftijd van de vloeistoffen is niet overal gelijk door de asymmetrische vorm van de vloeistofruimten (zie Figuur 4.1).



Figuur 4.1 *Tekening van losse platen*

Tabel 4.1 *Voor- en nadelen geldig voor alle typen platen warmtewisselaars*

| <i>Voordelen:</i>                                                                            | <i>Nadelen:</i>                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Grote ontwerp vrijheid in kanaalvorm en geometrie                                            | Gebrek aan ontwerp data                                                  |
| Minder kans op corrosie fouten t.g.v. productietechniek en materiaalkeuze dan 'Shell & Tube' | Beperkte ervaring in industrie (conservatieve instelling met name in VS) |
| Op het geplooid oppervlak 10 x lagere kans op vervuiling dan op glad oppervlak               |                                                                          |
| Chemische reiniging mogelijk                                                                 |                                                                          |

### 4.3 Prestatielimieten

Tabel 4.2 geeft een overzicht van het totale bereik van alle typen compacte (platen) warmtewisselaars. In Tabel 4.3 wordt voor een onderverdeling gemaakt voor het temperatuur- en drukgebied van een beperkt aantal typen warmtewisselaars. Het temperatuurgebied van plaat-frame warmtewisselaar is beperkt door de keuze van de pakking; van een gesoldeerde plaat door de sterkte van het soldeer. In de volgende subparagrafen worden nog per specifiek type plaat warmtewisselaar de (afwijkende) kentallen weergegeven.

Tabel 4.2 *Overzicht kentallen en limieten platen warmtewisselaars (Laval 2001), (Thonon 2000)*

|                         |                                                    | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> | <i>Opmerking</i>                                               |
|-------------------------|----------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------------------------------------------------------|
| Vermogen                | kW                                                 |                | 10500          |                                                                |
| Oppervlak               | m <sup>2</sup>                                     |                |                |                                                                |
| • Totaal                |                                                    | 0,1            | 2200           |                                                                |
| • per plaat             |                                                    | 0,02           | 3-54/155       |                                                                |
| Overdrachtcoëfficiënt U | W/m <sup>2</sup> K                                 | 3500           | 7500<br>10.000 | Vloeistof-vloeistof<br>Water-stoom<br>(condensatie/verdamping) |
| Druk                    | bar                                                |                | 25-1000        |                                                                |
| Temperatuur             | °C                                                 | -200           | 900            |                                                                |
| Drukval                 | kPa                                                |                | 20-100         | Voor water-water systemen                                      |
| Debiet                  | m <sup>3</sup> /h                                  | 0,18           | 5000           | (Reay 1999)                                                    |
|                         | kg/h                                               | 200            |                |                                                                |
|                         | kg/s                                               | 0,05           | 1000           |                                                                |
| Snelheid                | m/s                                                | 0,01           | 5              | Aansluiting                                                    |
|                         |                                                    | 0,1            | 3              | Limieten plaat                                                 |
|                         |                                                    | 0,2            | 0,8            | Gewenst plaat (voor laag viskeuze vloeistoffen)                |
| Aansluitingen           | mm                                                 | 30             | 450            |                                                                |
| Plaat afstand           | mm                                                 | 1,4-2          |                |                                                                |
| Volume per plaat        | liter                                              | 0,09           |                |                                                                |
| Plaat                   | mm                                                 |                |                |                                                                |
| - dikte                 |                                                    | 0,3            | 0,8            |                                                                |
| - diepte kanalen        |                                                    | 2              | 16             |                                                                |
| Aantal platen           | -                                                  | 10             | 100            | Aantal kanalen medium is heft van aantal platen                |
| Hydraulische diameter   | mm                                                 | 2              | 5              | Bron: (Carp 1999)                                              |
| Weglengte               | mm                                                 | 200            | 2000           | Bron: (Carp 1999)                                              |
| Verhouding l/d          | -                                                  | 40             | 1000           | Door golven in plaat blijft stroom wel turbulent               |
| Materiaal               |                                                    |                |                |                                                                |
| • plaat                 | RVS AISI 304/316, Incoloy™, Hastelloy™ of titanium |                |                | Afhankelijk van temperatuur en chloor concentratie             |
| • pakking               | Nitrile; EPDM                                      |                |                |                                                                |

4 Met behulp van conventionele productie (persen)

5 Met behulp van explosie gevormde platen [Thonon, June 2000 #8]

Tabel 4.3 *Kentallen temperatuur, druk en compactheid van de belangrijkste type platen warmtewisselaars Bron: (IEA, 1996)*

| Type                    | Temperatuur [°C] | Maximale druk [bar]              | Compactheid [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ] |
|-------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| Plaat & frame           | -35-200          | 25                               | < 200                                         |
| Gesoldeerde plaat       | -195-200         | 30                               | < 200                                         |
| Gelaste plaat           | -200-700         | 60                               | 200                                           |
| Plaat-vin <sup>6</sup>  | -200-600         | 96,5                             | 700-1500                                      |
| Geprint circuit (micro) | -200-900         | 300-400<br>500-1000 <sup>7</sup> | 200-5000                                      |

#### 4.4 Uitvoeringen

In totaal zijn er tenminste vijftien typen compacte warmtewisselaar op de markt verkrijgbaar (Reay 1999). In Tabel 4.4 worden de belangrijkste weergegeven en beschreven in de aangegeven paragraaf. Ook een beperkt aantal niet platen warmtewisselaars worden genoemd.

Tabel 4.4 *Overzicht uitvoeringen compacte warmtewisselaars*

| Afkorting:                                   | Engelse naam:                            | Nederlandse naam:                      | Paragraaf: |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|------------|
| PHE                                          | Plate-and-frame heat exchanger           | Plaat & frame warmtewisselaar          | 4.4.1      |
|                                              |                                          | • Dubbelwandig                         | 4.4.1.1    |
|                                              |                                          | • Grafiet                              | 4.4.1.2    |
|                                              |                                          | • dubbel stroom                        | 4.4.1.3    |
| BPHE                                         | Brazed plate heat exchanger              | Gesoldeerde plaat warmtewisselaar      | 4.4.2      |
| WPHE                                         | Welded plate heat exchanger              | Gelaste plaat warmtewisselaar          | 4.4.3      |
| SHE                                          | Spiral plate heat exchanger              | Spiraal plaat warmtewisselaar          | 4.4.4      |
| PFHE                                         | Plate-fin heat exchanger                 | Plaat-vin warmtewisselaar              | 4.4.5      |
| PCHE                                         | Printed-circuit heat exchanger           | Geprint circuit warmtewisselaar        | 4.4.6      |
| PMHE                                         | Porous matrix heat exchanger             | Poreuze matrix warmtewisselaar         | 4.4.7      |
| PSHE                                         | Plate & Shell heat exchanger             | Plaat en mantel warmtewisselaar        | 5.2.2      |
| <i>Overige niet platen warmtewisselaars:</i> |                                          |                                        |            |
| S&T of<br>STHE                               | Compact Shell-and-tube heat<br>exchanger | Compacte bundelpijp<br>warmtewisselaar | 5.2.1      |

##### 4.4.1 Plaat & frame warmtewisselaar (PFHE)

De platen die het warmtewisselend oppervlak vormen worden onder druk bijeengehouden in een frame. Er worden pakkingen tussen de platen gebruikt om lekkage te voorkomen. In de platen is een patroon geperst waardoor stromingspatronen ontstaan. Deze zijn zodanig ontworpen dat een turbulente stroom ontstaat en vervuiling beperkt wordt. Elke fabrikant heeft zijn eigen unieke plaat ontwerp.

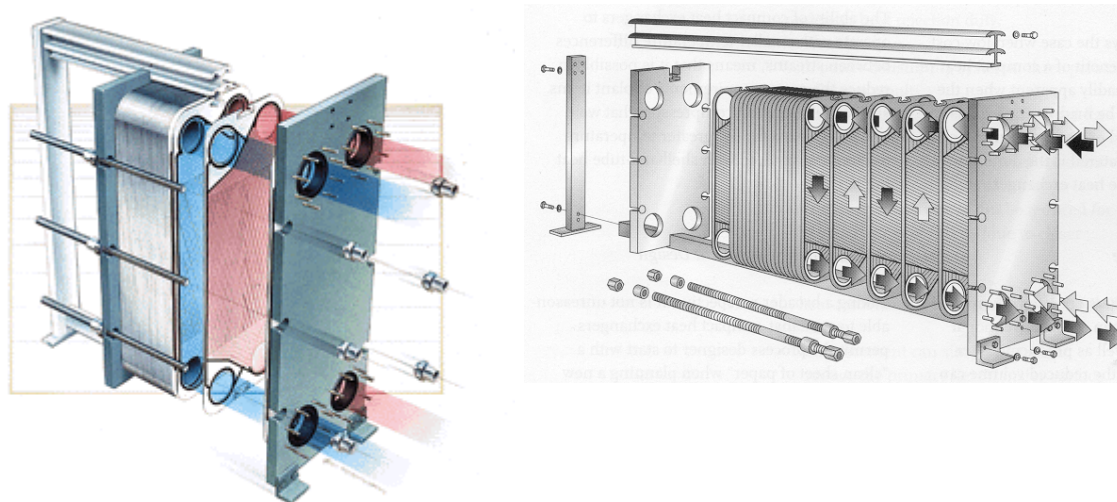
Tabel 4.5 *Voor- en nadelen plaat en frame warmtewisselaar*

| Voordelen:                        | Nadelen:                                                     |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Modulaire opbouw                  | Beperking temperatuur- en drukbereik door noodzaak pakkingen |
| Mechanische reiniging is mogelijk |                                                              |

<sup>6</sup> Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen gesoldeerde en diffusie-gebonden plaat-vin warmtewisselaars.

<sup>7</sup> [Thonon, June 2000 #8]

Een voordeel van de modulaire opbouw is om meerdere warmtewisselaarsecties in één frame op te bouwen. Verder is het mogelijk om bij verkeerd ingeschatte bedrijfscondities naderhand de capaciteit of drukval van de warmtewisselaar te wijzigen.



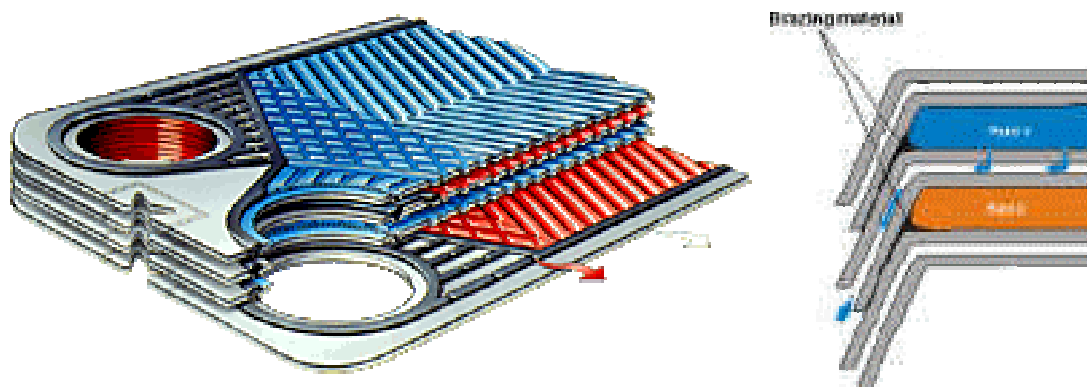
Figuur 4.2 Tekening van een opengewerkte plaat-frame warmtewisselaars

Tabel 4.6 Overzicht kentallen en limieten plaat-frame warmtewisselaars

|              |                                                                                                                         | Minimum | Maximum | Opmerking                |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|--------------------------|
| Druk         | bar                                                                                                                     |         | 25      |                          |
| Temperatuur  | °C                                                                                                                      | -35     | 220     | Gelimiteerd door pakking |
| Toepassingen | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voedingsindustrie (melk, frisdrank, ...)</li> <li>• Stadsverwarming</li> </ul> |         |         |                          |

#### 4.4.1.1 Dubbelwandige platen warmtewisselaar

Geschikt voor overdracht van warmte van twee media die elkaar echt niet mogen ontmoeten. De enkele plaat is vervangen door een dubbele plaat. Er wordt gebruik gemaakt van conventionele pakkingen. In geval van lekkage is dit zichtbaar aan de buitenzijde van de warmtewisselaar.



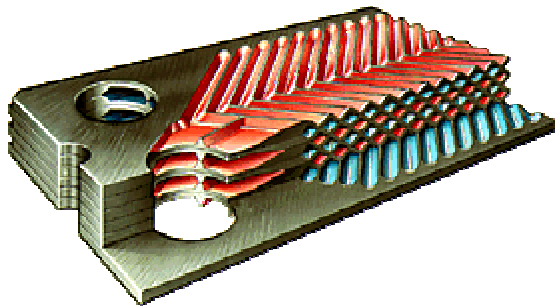
Figuur 4.3 Tekening van de platen van een dubbelwandige platen warmtewisselaar

Tabel 4.7 *Overzicht kentallen en limieten dubbelwandige platen warmtewisselaars*

|              |                                                                                                                      | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> | <i>Opmerking</i> |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------------|
| Druk         | bar                                                                                                                  |                | 40             |                  |
| Temperatuur  | °C                                                                                                                   | -50            | 350            |                  |
| Toepassingen | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tapwater verhitting</li> <li>▪ Verwarmen/koelen reactieproducten</li> </ul> |                |                |                  |

#### 4.4.1.2 Grafiet platen warmtewisselaar

Geschikt voor extreem corrosieve media. Alfa Laval levert deze in twee corrosie bestendige kwaliteiten (Diabon F100 en NS1).



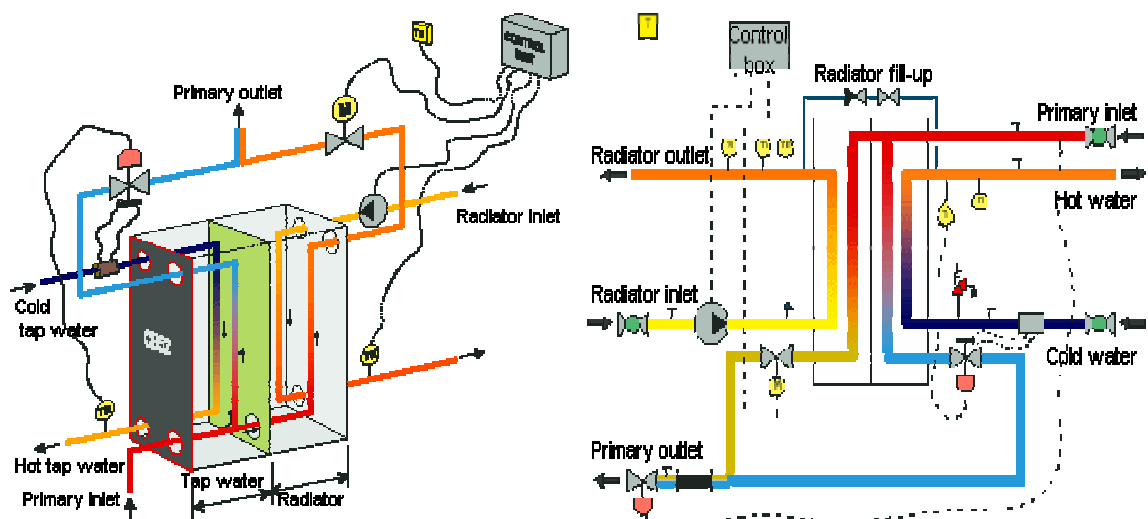
Figuur 4.4 *Tekening van de platen van een grafiet platen warmtewisselaar*

Tabel 4.8 *Overzicht toepassingen grafiet platen warmtewisselaars*

|              |                                                                                                                                   |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Toepassingen | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Oppervlaktebehandeling metalen (Bv. beitsbaden)</li> <li>▪ Zoutzuur productie</li> </ul> |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### 4.4.1.3 Dubbele stroom warmtewisselaar

Voor de warmtevraag van 1-gezinswoning is een thermisch vermogen van 15-30 kW en een debiet van 0,2-0,35 l/s noodzakelijk. Voor de ruimteverwarming en tapwater vraag kan een dubbele stroom of een parallel platen warmtewisselaar worden toegepast. In het platenpakket wordt een scheidingsplaat gebruikt die het tapwater en water voor ruimteverwarming scheidt.



Figuur 4.5 *Schets van stroomschema door dubbel-stroom warmtewisselaar. Bron: AlfaLaval*

#### 4.4.2 Gesoldeerde platen warmtewisselaar (BPHE)

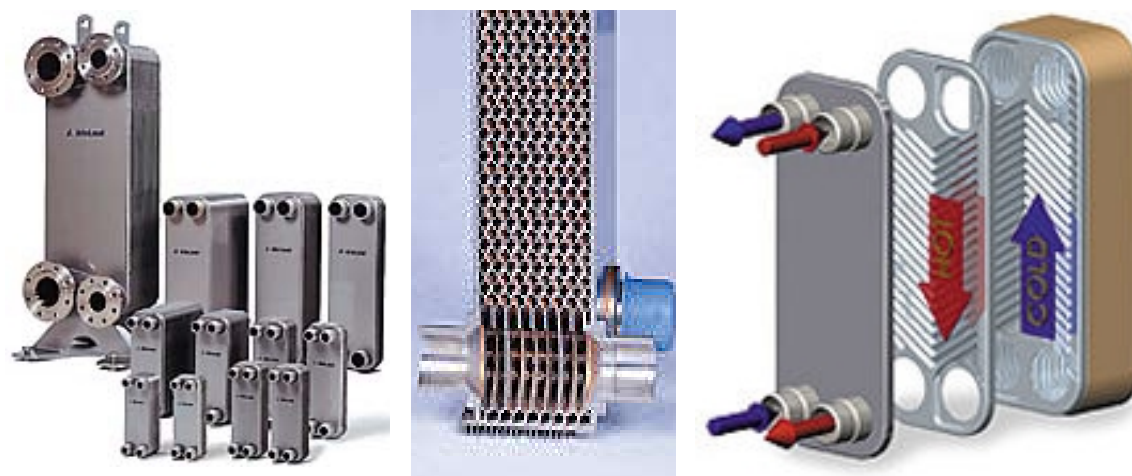
Bij gesoldeerde platen warmtewisselaars zijn de pakkingen vervangen door aan elkaar gesoldeerde platen. Het resultaat is afhankelijk van het vermogen een zeer compact type warmtewisselaar.

Tabel 4.9 Voor- en nadelen van gesoldeerde platen warmtewisselaars

| Voordelen:                                                                             | Nadelen:                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Lage investering                                                                       | Niet geschikt voor vervuilende media |
| Laag gewicht (tot 200 m <sup>2</sup> /ton)(± ¼ kg/kW)                                  | Geen mechanische reiniging mogelijk  |
| Beperkte ruimte (tot 10 cm hoog) (compactheid tot 330 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) |                                      |
| Snel systeem t.g.v. beperkt inwendig volume                                            |                                      |
| Laag drukverlies                                                                       |                                      |

Tabel 4.10 Overzicht kentallen en limieten gesoldeerde platen warmtewisselaars

|                         |                                                                                                                                                            | Minimum | Maximum  | Opmerking     |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|---------------|
| Vermogen                | kW                                                                                                                                                         | <16     | 360-1000 | (Reay 1999)   |
| Oppervlak (per plaat)   | m <sup>2</sup>                                                                                                                                             |         | 0,1      | (Thonon 2000) |
| Overdrachtcoëfficiënt U | W/m <sup>2</sup> K                                                                                                                                         |         |          |               |
| Druk                    | bar                                                                                                                                                        | vacuüm  | 31       |               |
| Temperatuur             | °C                                                                                                                                                         | -195    | 2008-400 |               |
| Debiet                  | m <sup>3</sup> /h                                                                                                                                          |         | 140      |               |
| Aansluitingen           | mm                                                                                                                                                         |         |          |               |
| Toepassingen            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Airconditioning</li> <li>• Proceswater verwarming</li> <li>• Warmteterugwinning</li> <li>• Combi-ketel</li> </ul> |         |          |               |

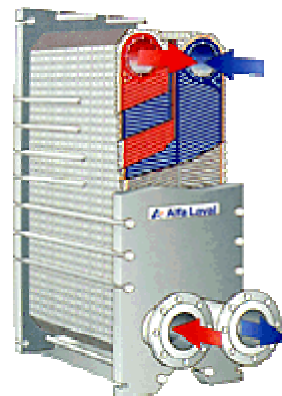


Figuur 4.6 Foto's van gesoldeerde platen warmtewisselaars in verschillende afmetingen (links), een opgewerkt zijaanzicht (midden) en het stromingspatroon van het warme en koude medium (rechts)



#### 4.4.3 Gelaste platen warmtewisselaar (WPHE)

De warmtewisselaar is pakkingvrij. Geschikt voor vloeistoffen, gassen en mengsels van vloeistoffen en gassen. Geschikt voor agressieve media, hoge drukken en hoge en lage temperaturen. Gelaste platen worden ook gebruikt in 'shell-plate' warmtewisselaars (zie Paragraaf 0). Bekende merknamen zijn: AlfaRex, Bavex™, Platular™, Compabloc® en Packinox (zie Tabel 4.11).



Figuur 4.7 Tekening van een gelaste platen warmtewisselaar (AlfaRex)

Tabel 4.11 Overzicht kentallen en limieten van een vijftal gelaste platen warmtewisselaars

|              |                                | AlfaRex                                                                                                                                                                                          | Bavex™   | Platular™ | Compabloc® | Packinox |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------------|----------|
| Druk         | bar                            | 40                                                                                                                                                                                               | 60       | 40        | 32         | 300      |
| Temperatuur  | °C                             | -50-350                                                                                                                                                                                          | -200-900 | tot 700   | tot 300    | -200-700 |
| Compactheid  | m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> | 300                                                                                                                                                                                              | 200-300  | 200       | tot 300    | tot 300  |
| Toepassingen |                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwarming van organische chemicaliën</li> <li>• Oververhitters bij warmteterugwinning</li> <li>• Koelinstallaties</li> <li>• Stoomopwekking</li> </ul> |          |           |            |          |

#### 4.4.4 Spiraal plaat warmtewisselaars (SHE)

Dit type warmtewisselaar is ideaal voor het uitwisselen van warmte van twee vrijwel identieke media. Het apparaat bestaat uit twee metalen strips gewonden rondom het centrum zodanig dat er twee spiraal-vormige doorgangen worden gevormd en kan worden beschouwd als een opgerolde platen warmtewisselaar. Dit type is geschikt voor het toepassen van vervuilde media. De stromingsconfiguratie is kruis- of tegenstroom. Kruisstroom wordt toegepast in condensors en reboilers. Foto's en tekeningen worden weergegeven in Figuur 4.8. In de bijlage worden nog enkele relaties voor het Nusselt getal gegeven.

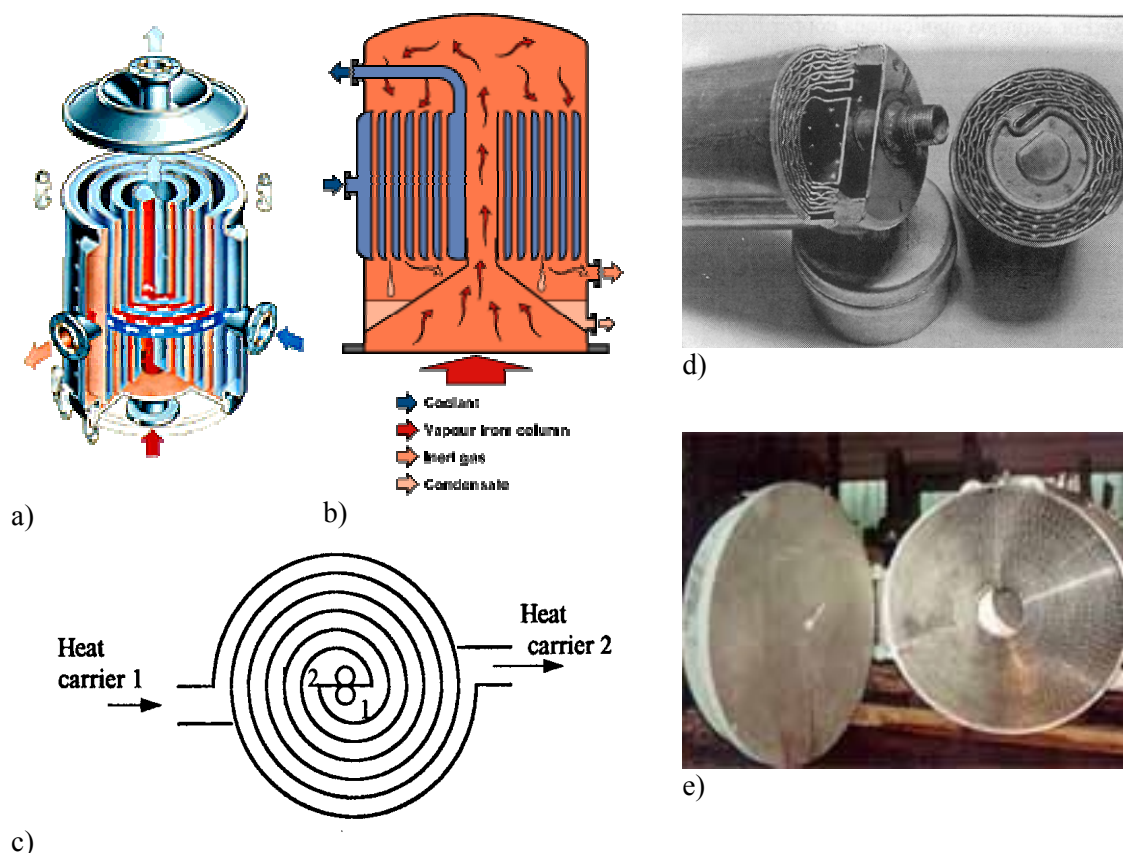
Tabel 4.12 Voor- en nadelen van een spiraal plaat warmtewisselaar

| <i>Voordelen:</i>                          | <i>Nadelen:</i>                                            |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Zelfreinigend                              | Minder geschikt voor hoge werkdrukken                      |
| Compact                                    | Kostbaar in aanschaf (met name bij 1 corrosieve vloeistof) |
| Tot 3x betere U dan 'Shell & Tube'         |                                                            |
| Geen dode hoeken gelijkmatige verblijftijd |                                                            |

In Tabel 4.13 worden de belangrijkste kentallen weergegeven van een spiraal plaat warmtewisselaar.

Tabel 4.13 *Overzicht kentallen en limieten spiraal plaat warmtewisselaars* (Thonon 2000)  
(Reay 1999)

|               |                                                                                              | Minimum  | Maximum | Opmerking       |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|-----------------|
| Oppervlak     | m <sup>2</sup>                                                                               | 0,05-0,5 | 465-500 |                 |
| Druk          | bar                                                                                          |          | 15-30   |                 |
| Temperatuur   | °C                                                                                           |          | 200-400 |                 |
| Spleetafstand | mm                                                                                           | 5-6,35   | 31,75   | 9,5 = standaard |
| Breedte       | mm                                                                                           | 150      | 2500    |                 |
| Diameter      | mm                                                                                           |          | 1500    |                 |
| Plaatdikte    | mm                                                                                           | 2        | 10      |                 |
| Toepassingen: | Koelers, branders, condensors, reboilers, gebruik in destillatie koloms, rioolwaterzuivering |          |         |                 |
| Opmerkingen:  | Geschikt voor media met een hoge viscositeit                                                 |          |         |                 |



Figuur 4.8 *Schematische weergave spiraal plaat warmtewisselaar a) opengewerkt b) dwarsdoorsnede van meerfase warmtewisselaar c) bovenaanzicht spiraal-stroom d) foto SHE e) 540 m<sup>2</sup> spiraal plaat warmtewisselaar van Hydroqs*

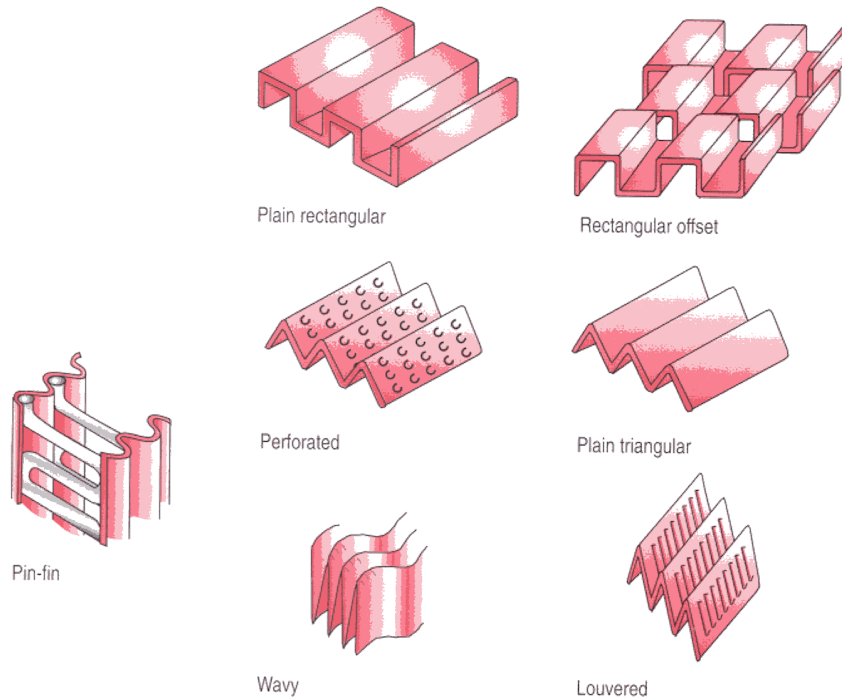
#### 4.4.5 Plaat-vin warmtewisselaar (PFHE)

In de jaren '40 zijn aluminium gesoldeerde plaat-vin warmtewisselaars ontwikkeld voor de luchtvaartindustrie om compacte en lichte gas/gas warmtewisselaars te realiseren. Sinds de jaren vijftig is de PFHE ook geschikt voor lage temperaturen. Toepassingen zijn het vloeibaar maken van natuurlijke gassen en lucht scheiding. De warmtewisselaar is uitermate geschikt voor kleine temperatuurverschillen<sup>9</sup> tussen de media (1 à 2 °C). Naast aluminium kan ook koper, RVS, titanium of keramiek (geschikt voor hoge temperaturen) worden gebruikt. Een groot aantal type vinnen komen in aanmerking (zie Figuur 4.9).

<sup>9</sup> Ten gevolge van een hoge UA is een kleine drijvende kracht voldoende voor een hoog thermisch vermogen.

Tabel 4.14 Voor- en nadelen van plaat-vin warmtewisselaars

| Voordelen:                                                                                                                                        | Nadelen: |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Zeer lage temperaturen mogelijk<br>Zeer licht van gewicht<br>Geschikt voor warmteoverdracht bij een kleine<br>temperatuurverschil tussen de media |          |

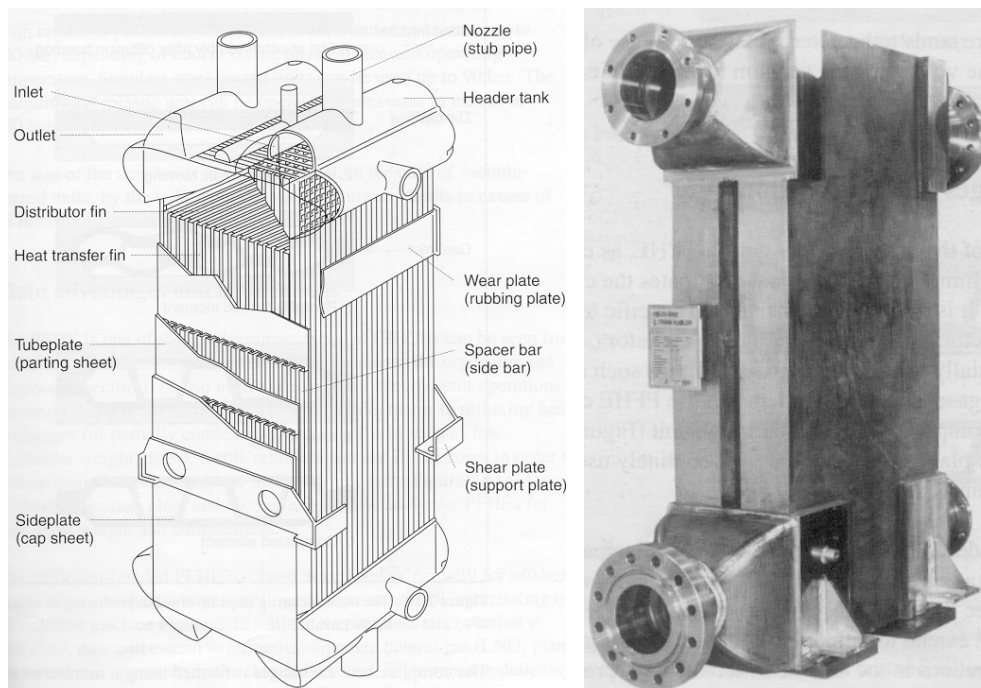


Figuur 4.9 Diverse type vinnen geschikt voor plaat-vin warmtewisselaars

Tabel 4.15 Overzicht kentallen en limieten plaat-vin warmtewisselaars

|              |                                                                                                                                                                    | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> | <i>Opmerking</i>                 |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| Compactheid  | m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>                                                                                                                                     | 800            | 1500           | Gesoldeerd                       |
|              |                                                                                                                                                                    | 700            | 800            | Diffusie-gebonden<br>(Reay 1999) |
| Volume 10    | m <sup>3</sup>                                                                                                                                                     |                | 15             |                                  |
| Druk         | bar                                                                                                                                                                |                | 90             | Gesoldeerd                       |
|              |                                                                                                                                                                    |                | 200            | Diffusie-gebonden                |
| Temperatuur  | °C                                                                                                                                                                 | < -213         | 100            | Voor aluminium                   |
|              |                                                                                                                                                                    |                | 800            | Voor RVS/titanium11              |
| Toepassingen | <ul style="list-style-type: none"><li>• Cryogene-gas industrie</li><li>• Off-shore (LPG)</li><li>• Auto industrie (radiatoren)</li><li>• Airconditioning</li></ul> |                |                |                                  |

10 Volume =  $\pm 10\%$  van 'Shell & Tube' warmtewisselaar  
 11 Als soldeer wordt nikkel, zilver of koper toegepast



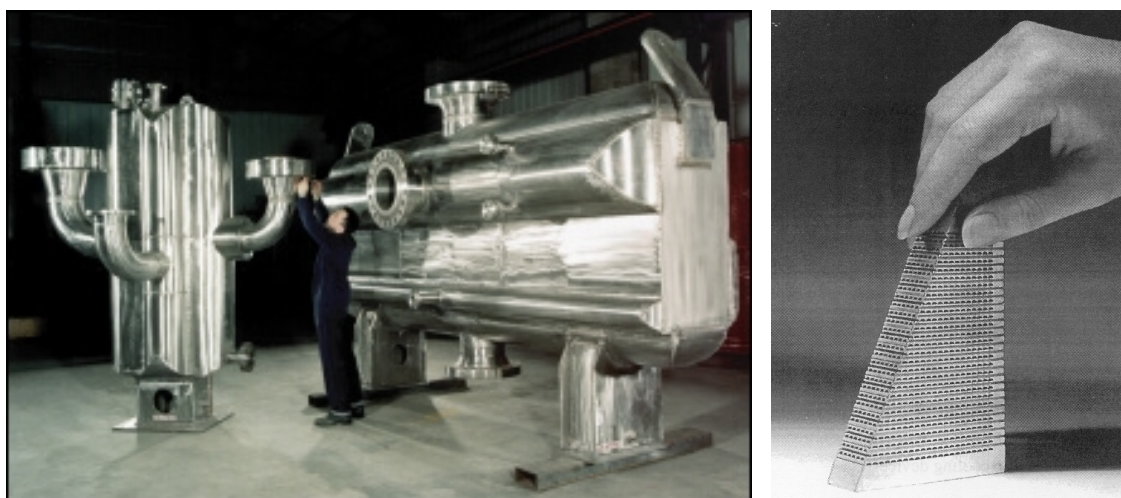
Figuur 4.10 Schematische weergave (links) en foto (rechts) van een gesoldeerde aluminium plaat-vin warmtewisselaar

#### 4.4.6 Geprint circuit warmtewisselaar (PCHE)

Geprint circuit warmtewisselaars zijn super compacte warmtewisselaars met een groot warmtewisselend oppervlak en een hoge warmteoverdrachtscoëfficiënt  $U$ . PCHE's worden vervaardigd uit metalen platen (veelal RVS) waarin chemisch kanalen worden geëtsd. Voor elke stroom is een apart kanaalontwerp noodzakelijk. De platen worden vervolgens op elkaar gediffundeerd tot een blok. De kanalen zijn 0,3 tot 1,5 mm diep. De laminaire stroom heeft een hoge  $U$  als gevolg. PCHE worden met name gebruikt voor corrosieve media die betrekkelijk schoon zijn (bijvoorbeeld offshore). De grootste beperking is de drukval in de microkanalen.

Tabel 4.16 Voor- en nadelen van geprint-circuit warmtewisselaars

| Voordelen:                       | Nadelen:                     |
|----------------------------------|------------------------------|
| Flexibiliteit in kanaalgeometrie | Hoge drukval bij hoog debiet |



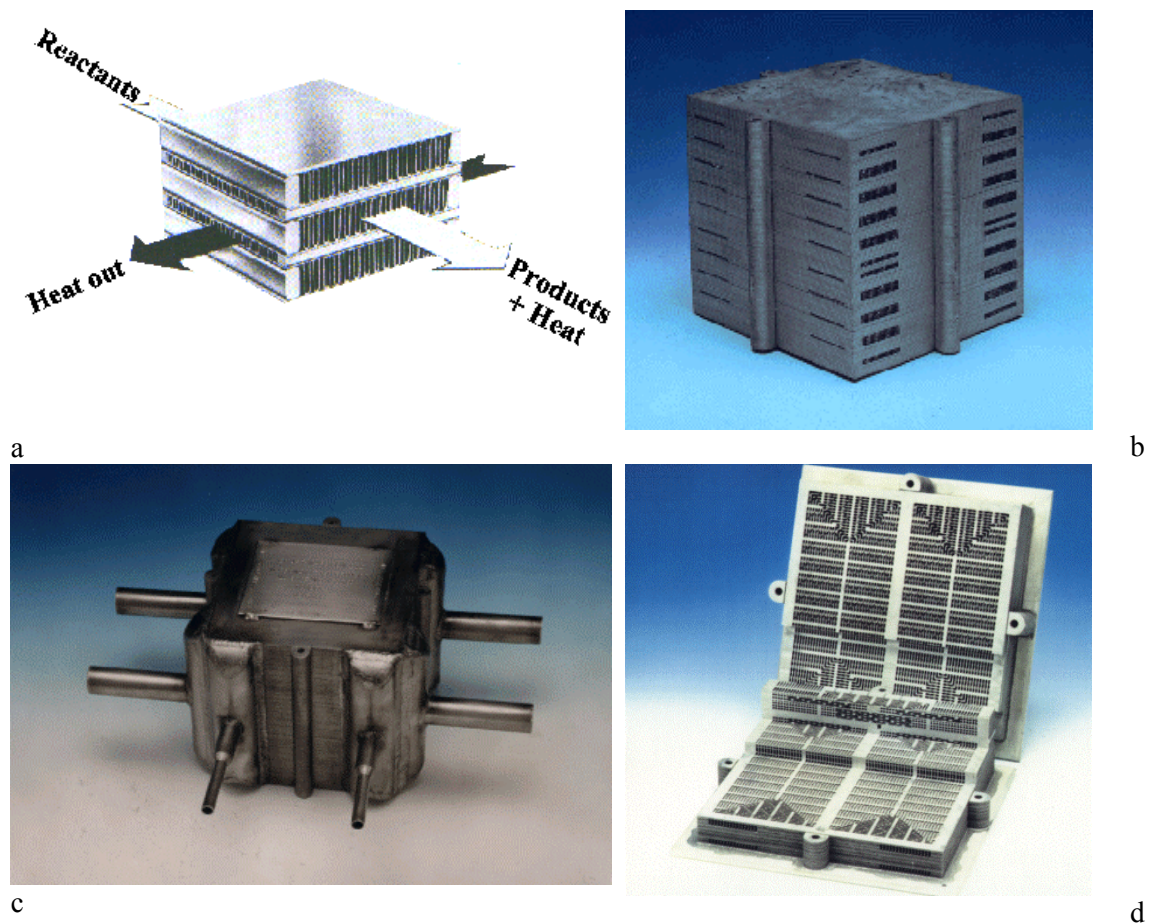
Figuur 4.11 Geprint circuit warmtewisselaar (PCHE) van Heatric Company



Tabel 4.17 *Overzicht kentallen en limieten geprint-circuit warmtewisselaars*

|              |                                | Minimum | Maximum | Opmerking               |
|--------------|--------------------------------|---------|---------|-------------------------|
| Compactheid  | m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> | 200     | 5000    | Marbond™<br>(Reay 1999) |
| Kanaaldiepte | mm                             | 0,3     | 2,0     |                         |
| Druk         | bar                            |         | 400     |                         |
| Temperatuur  | °C                             | -200    | 900     |                         |
| Toepassingen | • Off-shore                    |         |         |                         |

De Marbond™ warmtewisselaar bestaat uit gestapelde RVS platen en dient als chemische reactor (zie Figuur 4.12). De porositeit ligt ongeveer twee keer hoger dan een conventionele geprinte circuit warmtewisselaar. Het volume van het systeem komt overeen met vijf procent van het volume van een ‘Shell & Tube’ warmtewisselaar met een gelijk vermogen.

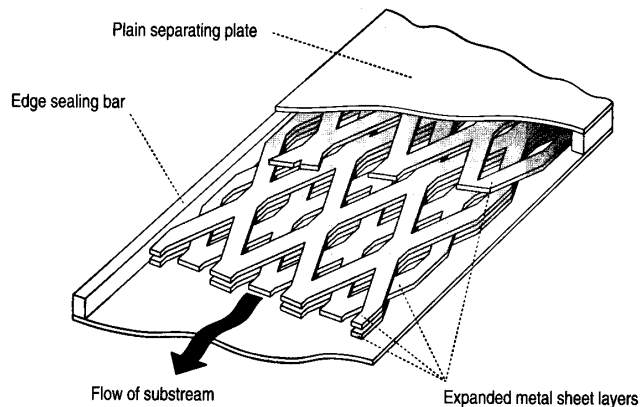


Figuur 4.12 *Marbond™ warmtewisselaar: gecombineerde warmteoverdracht en chemische reactie (HEX-reactor)*

#### 4.4.7 Poreuze matrix warmtewisselaar (PMHE)

Een warmtewisselaar bestaande uit gestapelde geperforeerde platen gemaakt van een materiaal met een hoge warmtegeleiding (koper of aluminium) afgewisseld met een scheidingsplaat met een slechte warmtegeleiding (kunststoffen of RVS) (Thonon 2000).

Door een driedimensionale stroming rond de plaat is een lagere wrijvings factor en een hogere warmteoverdrachtscoëfficiënt  $U$  dan bij een PFHE gerealiseerd. De hydraulische diameter is ongeveer een halve millimeter. Geschikt voor met name gas-vloeistof stromen. Een voorbeeld van een toepassing is een absorptie cyclus voor lucht koeling<sup>12</sup>.



Figuur 4.13 Schematische weergave poreuze matrix warmtewisselaar (IEA 1996)

#### 4.4.8 Overige typen (platen)warmtewisselaars

Een beperkt aantal specifiek ontwikkelde platen warmtewisselaars is niet behandeld in dit hoofdstuk. Voor onderstaande typen wordt verwezen naar data van de leveranciers (o.a. Alfa Laval).

- hygiënische platen warmtewisselaar,
- semi-gelaste platen warmtewisselaar voor agressieve media,
- brede tussenruimte platen warmtewisselaar voor vezelachtige media.

### 4.5 Ontwerp

Op internet biedt Alfa Laval HVAC&R selectieprogramma's voor een optimale keuze van platen warmtewisselaars voor vloeistof-vloeistof (WebcALc<sup>TM</sup>)<sup>13</sup> en voor verdamping en condensatie (WebcALcR<sup>TM</sup>). Zie voor software ook Bijlage B.

Voor vergelijkingen voor het ontwerp van warmtewisselaars (o.a. de epsilon-NTU methode) wordt eveneens verwezen naar de bijlage nummer???

Om vervuiling van platen warmtewisselaars te beperken worden de volgende ontwerprandvoorwaarden aanbevolen: (Thonon 2000):

- minimale snelheid bedraagt 0,3 m/s,
- een plooihoek van 60° is gunstiger dan een kleinere plooihoek van de plaat,
- maximaal 25% marge inbouwen voor vervuiling.

<sup>12</sup> David Reay, PO Box 25, Whitley Bay, Tyne & Wear, NE26, 1QT, fax: 0191 252 2229

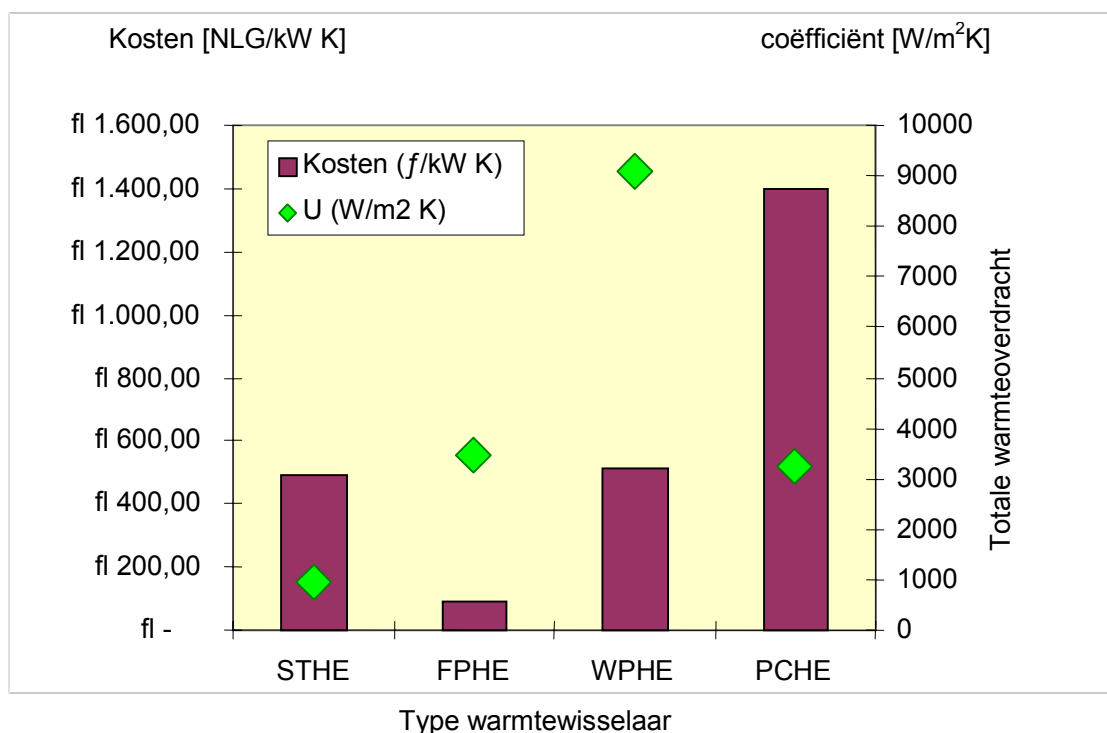
<sup>13</sup> Zie: <http://webcalc.martinson.se/design.asp>

## 4.6 Prijs

De kosten van een warmtewisselaar zijn sterk afhankelijk van de compactheid en de hoogte van de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Naast de investeringskosten (kapitaalkosten) moet voor een goede vergelijking ook de kosten van installatie, onderhoud en kosten ten gevolge van drukverlies worden meegenomen in de kostencalculatie. De installatiekosten kunnen voor een 'Shell & Tube' warmtewisselaar (STHE) oplopen tot 4 à 5 keer de kapitaalkosten; voor een plaat warmtewisselaar 'slechts' 2 à 3 keer de kapitaalkosten (Reay 1999). Daarnaast zijn besparingen mogelijk t.o.v. een STHE door ruimtebesparing of door besparing op draagconstructies.

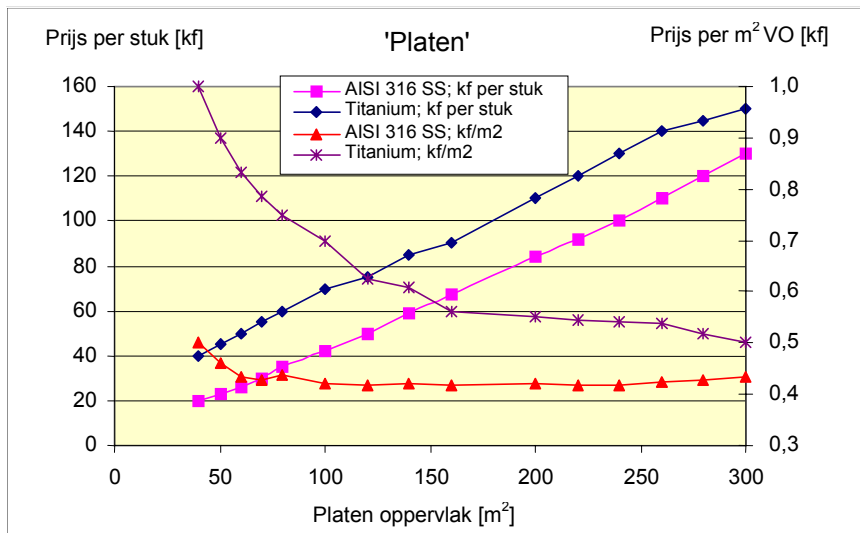
De kapitaalkosten van een PHE liggen een orde lager dan van een STHE (zie Figuur 4.14). Dit komt mede door de veel hogere totale warmteoverdrachtscoëfficiënt  $U$ . De gelaste versie heeft een nog hogere waarde van  $U$ , maar desondanks zijn de kosten vergelijkbaar met die van een STHE. Bij een PCHE liggen de kapitaal kosten wel veel hoger dan een STHE.

De kosten van een PSHE<sup>14</sup> zijn vergelijkbaar met een geïsoleerde STHE; maar ongeveer 20% hoger dan een ongeïsoleerde STHE. In gebruik en onderhoud is een PSHE echter significant goedkoper dan een STHE door dat het gewicht slechts 25% van een STHE en het volume 6-10% van een STHE bedraagt.

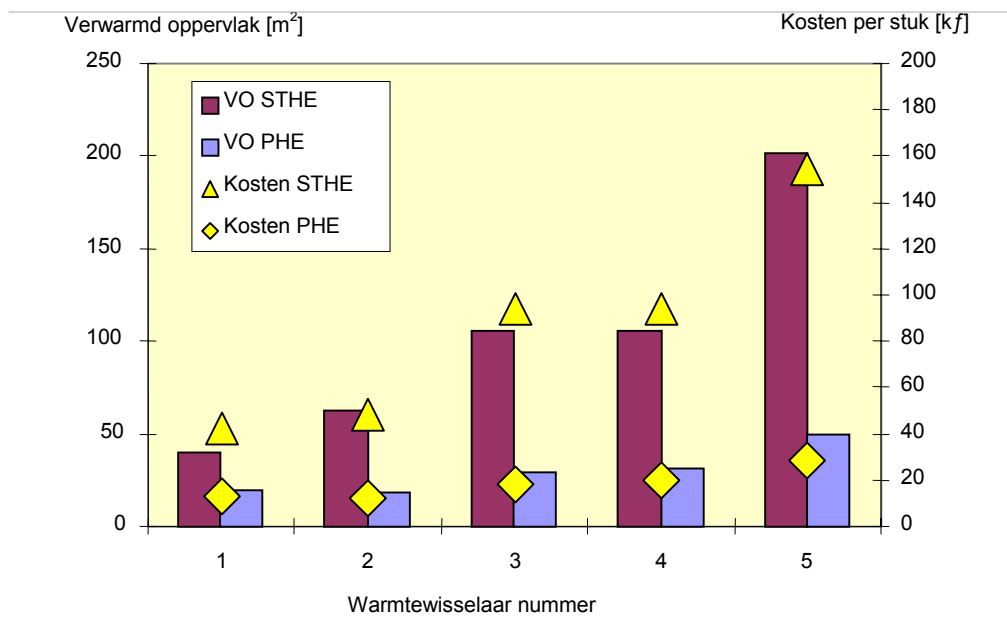


Figuur 4.14 *Vergelijking kapitaalkosten van diverse typen warmtewisselaars in relatie met de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt  $U$ . (Voor de vergelijking is voor de verhouding thermisch vermogen-temperatuurverschil tussen warme en koude medium genomen de waarde  $Q/dT = 20 \text{ kW/K}$ ; koude en warme stroom = water; koers Engelse Pond = 3,5 NLG) (ESDU, 1993) (Reay 1999)*

14 'Plate Shell' warmtewisselaar, zie Paragraaf 0



Figuur 4.15 *Vergelijking kosten platen warmtewisselaars<sup>15</sup> (DACE 1999)*



Figuur 4.16 *Vergelijking kosten en verwarmd oppervlak uit een study van ETSU voor omschakeling van vijf warmtewisselaars van 'Shell & Tube' naar plaat warmtewisselaars in een ruwe olie voorverwarmingsstap. De kapitaalkosten liggen voor alle plaat warmtewisselaars aanzienlijk lager dan van een 'Shell & Tube'. De kosten zijn vrijwel evenredig met het benodigd verwarmd oppervlak (VO) (koers US \$ = 2,5 NLG) (Reay 1999)*

Zie ook:

- Data Item 19013, *Selection and costing of heat exchangers*, Engineering Sciences Data Unit (ESDU)16, London, 1992.
- Data Item 19013, *Costing of plate-fin heat exchangers*, Engineering Sciences Data Unit (ESDU), London, 1997.

<sup>15</sup> VO = verwarmd oppervlak

<sup>16</sup> EDSU International plc, Corsham Street 27, London, N1 6UA, UK, tel: +44-171-4905151; fax: +44-171-4902701; <http://www.esdu.com>



## 5. 'SHELL & TUBE' WARMTEWISSELAARS

De Nederlandse benaming voor 'Shell & Tube' is bundelpijp warmtewisselaars. Pijpen worden via een vast patroon gebundeld en met keerschotten ondersteund. De bundel wordt in zijn geheel in een mantel geschoven. In de mantel bevinden zich de aansluitingen voor de primaire en secundaire stroom. Dit type warmtewisselaar is wereldwijd nog steeds het meest toegepaste type in de industrie (Reay 1999).

Tabel 5.1 Voor- en nadelen van 'Shell & Tube' warmtewisselaars

| <i>Voordelen:</i> | <i>Nadelen:</i>                  |
|-------------------|----------------------------------|
| Bekende techniek  | Volumineus<br>Lastig te reinigen |



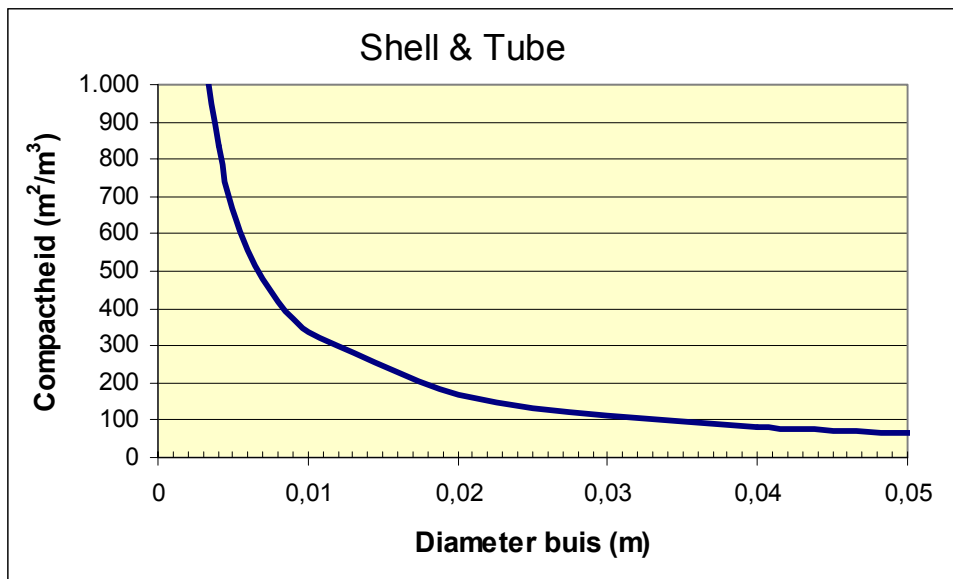
Figuur 5.1 Foto van een tweetal bundelbuizen van 'Shell & Tube' warmtewisselaars

### 5.1 Prestatie limieten

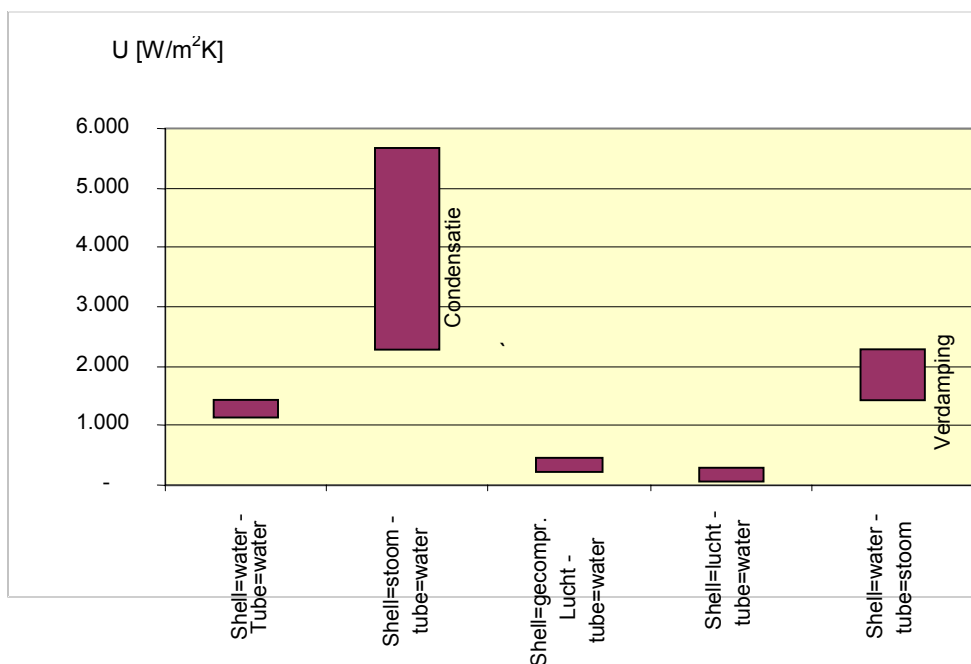
In Tabel 5.2 wordt een overzicht gegeven van kentallen voor conventionele 'Shell & Tube' warmtewisselaars.

Tabel 5.2 Overzicht kentallen en limieten conventionele 'Shell & Tube' warmtewisselaars

|                          |                    | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> | <i>Opmerking</i>                                         |
|--------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------------------------------|
| Vermogen                 | kW                 |                |                | Standaard                                                |
| • Condensor              |                    | 10             | 830            |                                                          |
| • verdamper              |                    | 18             | 1200           |                                                          |
| Oppervlak                | m <sup>2</sup>     | 0,5            | 40             | Bron: <a href="http://www.bloksma.nl">www.bloksma.nl</a> |
| Overdrachtscoëfficiënt U | W/m <sup>2</sup> K | 1000           | 1500           | Water-water                                              |
|                          |                    |                | 5600           | Stoom-water (verd. of cond.)                             |
| Druk                     | bar                |                | 32             | Richtlijn                                                |
| Temperatuur              | °C                 |                | 300            | Richtlijn                                                |
| Snelheid                 | m/s                |                |                | limiet                                                   |
|                          |                    | 1              | 2              | gewenst                                                  |
| Pijp                     |                    |                |                |                                                          |
| • diameter               | mm                 | 10-16          |                | Richtlijn = 19 mm                                        |
| • lengte                 | mm                 | 200            | 5000           |                                                          |
| • verhouding l/d         | -                  | 20             | 300            |                                                          |



Figuur 5.2 *Compactheid voor pijpenbundel warmtewisselaars ('Shell & Tube') als functie van de uitwendige pijpdiаметer*



Figuur 5.3 *Overzicht van de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt voor pijpenbundel warmtewisselaars voor verschillende media*

## 5.2 Uitvoeringsvormen

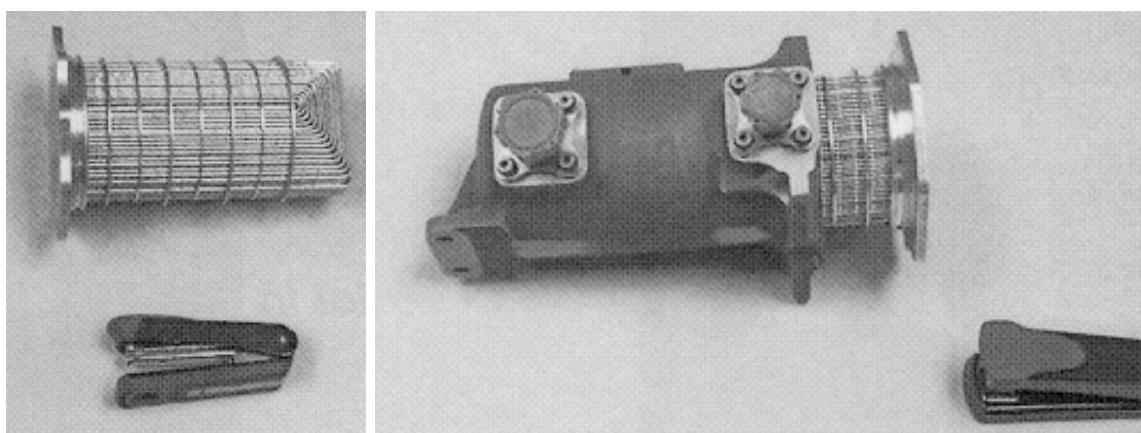
Naast de traditionele 'Shell & Tube' warmtewisselaar bestaat er ook een compacte uitvoering met zeer kleine diameter buizen en is het mogelijk de pijpenbundel in de mantel te vervangen door een pakket gestapelde platen.

### 5.2.1 Compacte 'Shell & Tube' warmtewisselaar

De buisdiameter is nu beperkt tot ongeveer 2 mm. In een bundel van 150 mm diameter gaan gebruikelijk zo'n 1300 pijpen. In toenemende mate worden ook polymeren<sup>17</sup> gebruikt als constructiemateriaal. Dat materiaal heeft een uitstekende chemische stabiliteit maar een slechte warmtegeleiding. Daarom kan in plaats van een wanddikte van 0,5 tot 1,0 mm ook een metaal gekozen worden met een polymeer film van 100 micrometer dikte.

Tabel 5.3 *Overzicht kentallen en limieten compacte 'Shell & Tube' warmtewisselaars*

|              |                                                                                                                        | Minimum | Maximum | Opmerking        |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|------------------|
| Pijpdiameter | Mm                                                                                                                     |         |         | Richtlijn = 3 mm |
| Compactheid  | m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>                                                                                         |         | 500     |                  |
| Toepassingen | <ul style="list-style-type: none"><li>• Vliegtuigmotor (brandstof voorverwarming/oliekoeler)(zie Figuur 5.4)</li></ul> |         |         |                  |



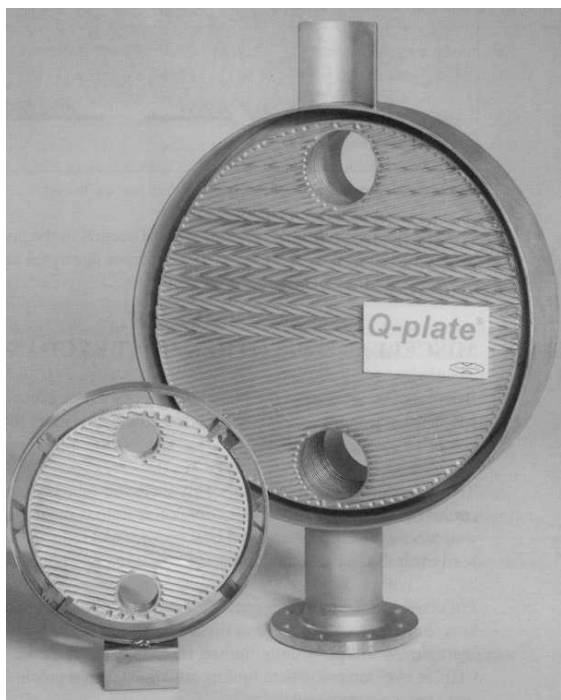
Figuur 5.4 *Foto van een compacte 'Shell & Tube' warmtewisselaar voor oliekoeling (Serck Aviation Ltd.)(nietmachine als vergelijking afmeting)*

### 5.2.2 'Plate & Shell' warmtewisselaar (PSHE)

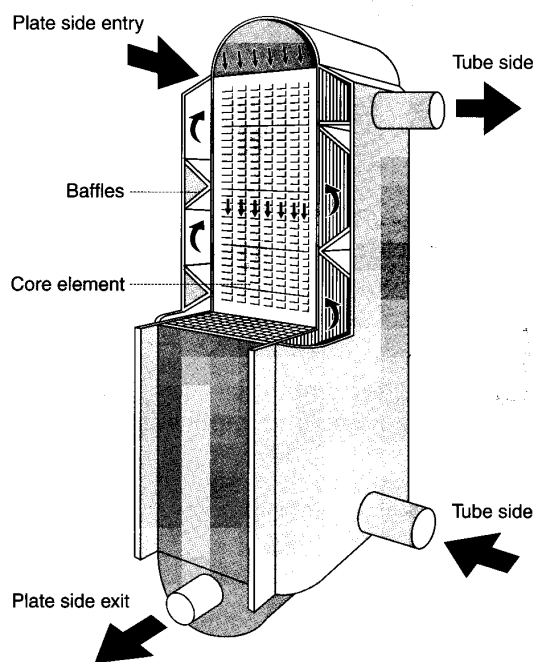
Er wordt hier een stapel platen in een mantel geschoven. Het primaire medium wordt op een vergelijkbare wijze doorstroomt als in een standaard platen warmtewisselaar. Aangezien de ruimte tussen de platen voor het secundaire medium naar de mantel open is, kan het medium vanuit de mantel rechtstreeks tussen de platen door stromen. In de mantel is het net als bij STHE mogelijk om van keerschotten gebruik te maken. In de procesindustrie kan dit type gebruikt worden voor kookprocessen aan de schaal zijde. Een hoge druk en reiniging is goed mogelijk aan de mantel zijde.

De Bavex™ is een voorbeeld van dit type warmtewisselaar ontwikkeld door Bavaria Anlagenbau GmbH. Hierbij is in Figuur 5.6 zichtbaar dat de stroom door de 'Shell' wordt omgebogen door de keerschotten (baffles). In Figuur 5.5 en Figuur 5.6 worden gebruik gemaakt van ronde platen. In de dwarsdoorsnede is zichtbaar dat er slechts twee gaten in de platen noodzakelijk zijn: voor aan- en afvoer van het primaire medium.

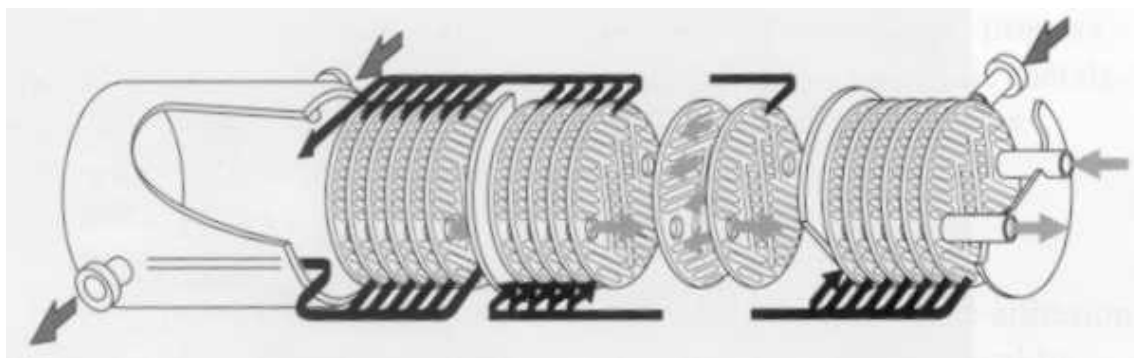
<sup>17</sup> Een voorbeeld is PEEK (Polyetheretherketone) met een maximale temperatuur van 200 °C



Figuur 5.5 Foto van de 'Plate & Shell' warmtewisselaar (merknaam: Q-plate; leverancier: Wybenga BV) (Reay, 1999)



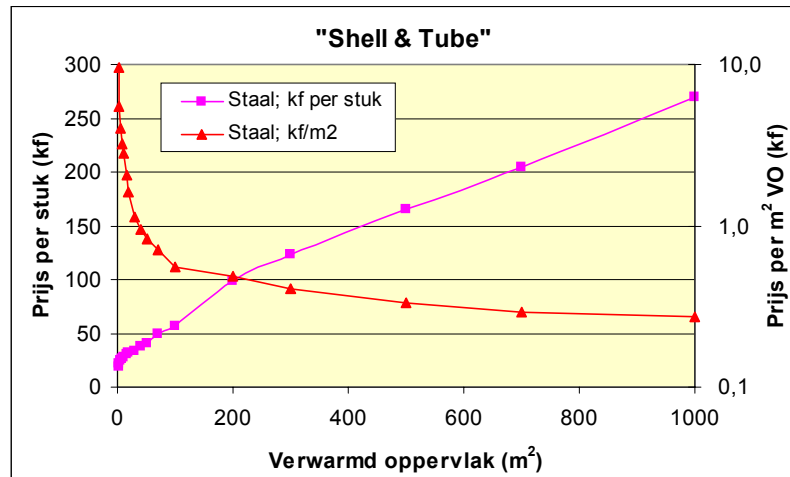
Figuur 5.6 De layout van de Bavex™ gelaste platen warmtewisselaar (Reay, 1999)



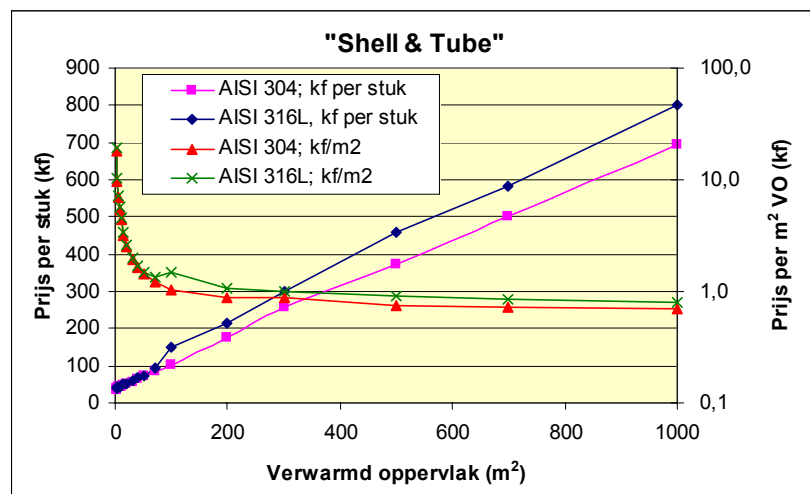
Figuur 5.7 Tekening van een 'Plate & Shell' warmtewisselaar (Reay, 1999)

### 5.3 Prijs

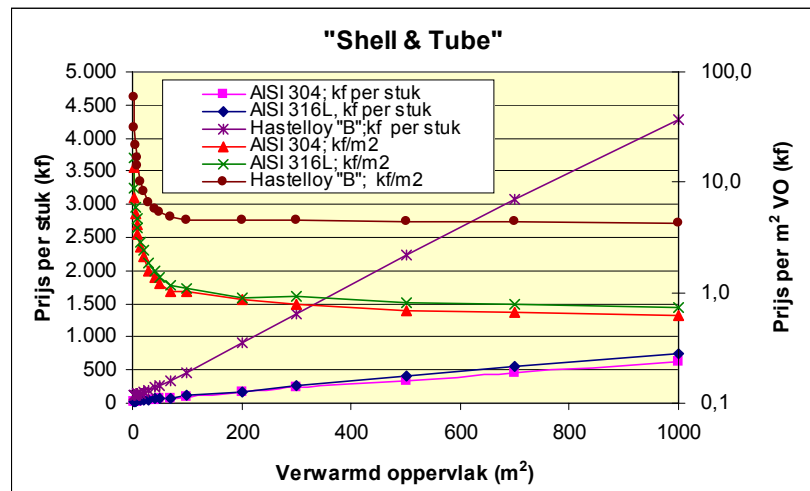
Pijpenbundels en mantel van staal, vaste pijpplaten, zonder expansievoorziening; pijp 20 mm; U pijpen 10-15 % duurder en 5-12 % zwaarder



Pijpenbundels en mantel van RVS, vaste pijpplaten, zonder expansievoorziening; pijp 20 mm; U pijpen 10-15 % duurder en 5-12 % zwaarder



Mantel van staal; rest van RVS; vaste pijpplaten, zonder expansievoorziening; pijp 20 mm; U pijpen 10-15 % duurder en 5-12 % zwaarder



Zie ook (Reay 1999):

- Guyer, E.C., Handbook of applied thermal design, McGraw-Hill, New York, 1989.
- Purohikt, G.P., Estimating costs of shell and tube heat exchangers. Chem. Eng., pp56-67, 22 August 1983.
- Saunders, E.A.D., Heat exchangers, selection, design and construction, Longman, 1986.



## 6. OVERIGE TYPEN WARMTEWISSELAARS

Naast de in Hoofdstukken 4 en 5 besproken hoofdtypen warmtewisselaars, bestaan er nog scala aan andere of afgeleide modellen warmtewisselaars.

### 6.1 Heat pipe warmtewisselaar (HPHE)

Het hart van een HPHE bestaat uit een groot aantal parallelle warmte buizen (heat pipes). Dit zijn hermetisch gesloten buisjes van koper gevuld met een koudemiddel. In elke buis wordt inwendig een warmtetransportmedium (koudemiddel) verdampt en gecondenseerd. Het gecondenseerde koudemiddel zakt door de capillaire werking en/of de zwaartekracht terug naar de verdampersectie. De buitenzijde (met aluminium lamellen) wordt omstroomd door het warme medium (verdamerzijde) en het koude medium (condensatiezijde).



Figuur 6.1 Een tekening en foto van een heat pipes warmtewisselaar geschikt voor het uitwisselen van warmte van twee gassen.

Een belangrijke toepassing voor heatpipes is warmteterugwinning (zie Tabel 6.1). Het type warmtewisselaar valt onder de categorie 'regeneratieve systemen' gebruikmakend van een vloeibaar medium. In regeneratieve systemen wordt via een opslagmedium volgens een kringloopsysteem de warmte-uitwisseling bewerkstelligd.

Tabel 6.1 *Vergelijking prestaties van drie type warmtewisselaars geschikt voor warmteterugwinning (regeneratoren) (Faghri 1995)*

| Type:                                  | Effectiviteit<br>[%] | Compactheid<br>[W/m <sup>3</sup> °C] | Warmteoverdracht-drukval verhouding<br>[W/m <sup>2</sup> K]/[N/m <sup>2</sup> ] |
|----------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Roterende<br>regenerator <sup>18</sup> | 80                   | 5400                                 | 115                                                                             |
| Plaat WW <sup>19</sup>                 | 6520                 | 4140                                 | 20                                                                              |
| Heat Pipe WW <sup>21</sup>             | 6022                 | 7200                                 | 20                                                                              |

<sup>18</sup> Wordt ook wel warmtewiel genoemd. Kan ook mbv. LiCl<sub>3</sub> vochtoverdragen met een rendement van 70 %. Capaciteitsregeling mbv. variatie toerental. Apparaat kan zowel voelbare als latente warmte overdragen.

<sup>19</sup> Een plaat WW is een voorbeeld van een 'recuperatief systeem' (rechtstreekse warmteoverdracht via gemeenschappelijke scheidingsplaat)

<sup>20</sup> Opgave:PBNA: rendement = 50-80 %

<sup>21</sup> Bron: (Faghri 1995)

<sup>22</sup> Opgave:PBNA: rendement = 70 %

Tabel 6.2 Voor- en nadelen van HPHE

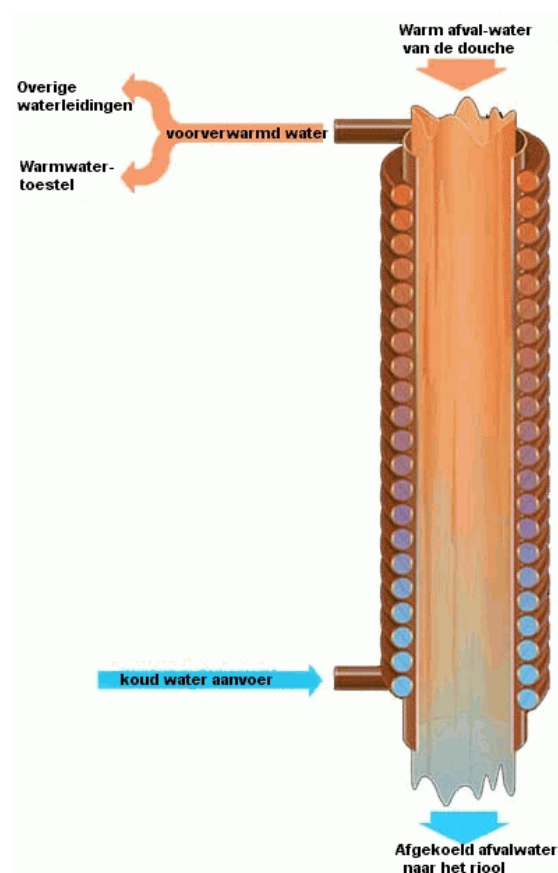
| <i>Voordelen:</i>      | <i>Nadelen:</i>                                                           |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Hoge bedrijfszekerheid | Investering ± twee keer zo groot als recuperatief systeem (bv. platen ww) |
| Gering onderhoud       |                                                                           |
| Lage exploitatiekosten |                                                                           |

## 6.2 Concentrische buis warmtewisselaar

Eén van de meest eenvoudige warmtewisselaars is een concentrische buis die in mee- of tegenstroom doorstroomt kan worden. Het gaat in principe om een ‘Shell & Tube’ warmtewisselaar met een mantel met slechts één buis.

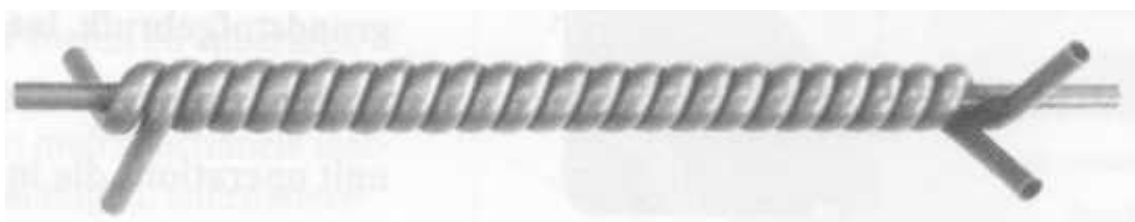


Figuur 6.2 Een voorbeeld van opgerolde concentrische buis warmtewisselaar (Alfa Laval)



Figuur 6.3 Een buis omwikkelt door een spiraalvormige buis als voorverwarming van douchewater

Ook voor sterk exotherme reacties is temperatuurbeheersing essentieel om neven- en volgreacties te voorkomen. Voor dit soort processen waar de warmtewisseling van belang is, is de HELIX reactor ontwikkeld (Figuur 6.4). Hiermee is het mogelijk om de productiewijze over te schakelen van batch naar continu.



Figuur 6.4 De HELIX reactor: een continue reactor(buis) met intensieve warmtewisseling door middel van een omwikkelde spiraalvormige buis



### 6.3 Radiator warmtewisselaar/plaat 'coil'

Radiator of plaat 'coil' warmtewisselaars worden inwendig doorstroomt (geforceerde convectie) en uitwendig vindt alleen natuurlijke convectie plaats. Het gaat om een dubbele plaat waar S-vormige buizen in zijn geperst.

Tabel 6.3 *Overzicht kentallen en limieten plaat 'coil' warmtewisselaars*

|              |                                         | Minimum | Maximum | Opmerking |
|--------------|-----------------------------------------|---------|---------|-----------|
| Druk         | bar                                     |         | 25      |           |
| Temperatuur  | °C                                      |         | 750     |           |
| Toepassingen | • Verwarming of koeling van (lak) baden |         |         |           |



Figuur 6.5 *Een voorbeeld van een plaat 'coil' warmtewisselaar. Leverancier: Geurts International BV. ; Fabrikant: Secathen*

### 6.4 (Mini) spiraal warmtewisselaar

Spiraal warmtewisselaars worden veel toegepast in tapwater buffers. Veel gebruikt materiaal is koper vanwege de goede geleiding en verwerking (kleine buigstraal).



Figuur 6.6 *Kleine spiraal warmtewisselaar met vinnen ( $1,0-2,4 \text{ m}^2$ ) (links) (<http://www.wieland.de>) en spiraal warmtewisselaar voor tapwaterbuffer (rechts)*



Tabel 6.4 *Overzicht kentallen en limieten (gevinde) spiraal warmtewisselaars*

|                    |                                                      | Minimum | Maximum | Opmerking                                                            |
|--------------------|------------------------------------------------------|---------|---------|----------------------------------------------------------------------|
| Vermogen           | W/K                                                  | 100     | 850     | Afhankelijk van debiet (0,1 tot 3,5 m <sup>3</sup> /h en temperatuur |
| Compactheid        | m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup><br>m <sup>2</sup> /kg |         | 0,33    |                                                                      |
| Afmetingen         |                                                      |         |         |                                                                      |
| • lengte buis      | mm                                                   | 2,45    | 16,88   |                                                                      |
| • diameter buis    | mm                                                   | 8       | 30      |                                                                      |
| • oppervlak        | m <sup>2</sup>                                       | 0,4     | 4,5     |                                                                      |
| • diameter montage | mm                                                   | 140     | 175     |                                                                      |
| Druk               | bar                                                  |         | 15      |                                                                      |
| Temperatuur        | °C                                                   |         | 150     |                                                                      |
| Toepassingen       | Tapwaterbereiding                                    |         |         |                                                                      |

## 6.5 Grafiet kubus/cilinder blok warmtewisselaar

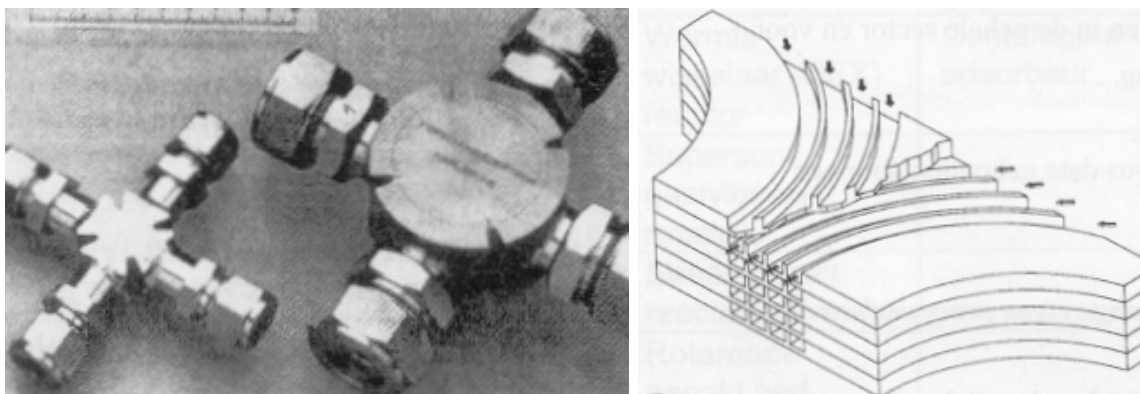
Dit type warmtewisselaar is geschikt voor o.a. extreem corrosieve media. Toepassingen zijn binnen de zware chemische productie of condensatie in de farmaceutische industrie. De warmtewisselaar bestaat volledig uit grafiet. Het frame is van RVS.

Figuur 6.7 *Grafiet kubus of blok warmtewisselaar*  
bron: [Geurts International BV](#).



## 6.6 Micro warmtewisselaar

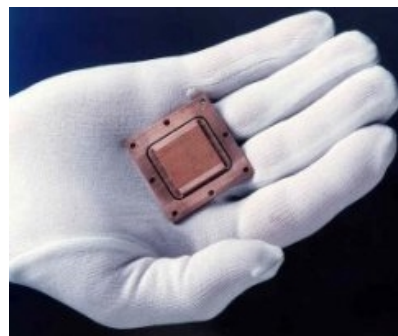
Een compacte warmtewisselaar wordt een micro warmtewisselaar genoemd indien de compactheid een waarde heeft groter dan 10.000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Er bestaat een micro warmtewisselaar met een compactheid van ±15.000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> en een hydraulische diameter van 0,089 mm (Reay 1999). Joule-Thompson koelers hebben een buis met een diameter van 0,25 mm en vindingen van 1 mm.



Figuur 6.8 *Compacte warmtewisselaar met micro kanalen waarin tevens reacties in uitgevoerd kunnen worden (Bakker 2001)*

Micro-Cats<sup>TM</sup> (Micro chemical and thermal systems)<sup>23</sup> heeft een warmtewisselaar ontwikkeld met micro kanalen van 10 tot 1000  $\mu\text{m}$  waarmee een totale warmteoverdracht coëfficiënt  $U$  van 10 tot 35  $\text{kW/m}^2 \text{ K}$  wordt behaald in combinatie met een lage drukval. Als toepassing wordt volgens de fabrikant onder andere gedacht aan een warmtepomp in een auto airconditioning.

Figuur 6.9 *Micro-Cats<sup>TM</sup> als voorbeeld van een micro warmtewisselaar*





## 7. VERBETERING WARMTEOVERDRACHT

Voor de verbetering van de warmteoverdracht zijn een groot aantal technieken ontwikkeld (zie Tabel 7.1). Een beperkt aantal is in dit hoofdstuk uitgewerkt.

Tabel 7.1 *Opties voor verbeterde warmteoverdracht* (Bailey 1999)

| <i>Principe/techniek:</i>                           | <i>Apparaat:</i>                                                                                                                                                                                                     | <i>Verwijzing:</i> |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Gemodificeerde buis geometrie                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vinnen op/in buis</li> <li>• Spiraalvormige buis</li> <li>• Gegroefde buis</li> </ul>                                                                                       | Paragraaf 0        |
| Oppervlaktebehandeling<br>Buis inwendig ('inserts') | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemodificeerd kookoppervlak</li> <li>• Draad matrix</li> <li>• 'Twisted tape'</li> <li>• Klokhuisvormige stang</li> <li>• Schroefveer</li> <li>• Statische mixer</li> </ul> | Paragraaf 7.2      |
| Gemodificeerde keerschotten                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schroefvormige keerschotten</li> <li>• Keerschotten met gridvormige gaatjes</li> </ul>                                                                                      | Paragraaf 7.3      |
| Film proces                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vallende film WW</li> <li>• Geschaafd oppervlak WW</li> <li>• 'Wiped-film' verdamper</li> </ul>                                                                             |                    |

### 7.1 Gevinde buizen

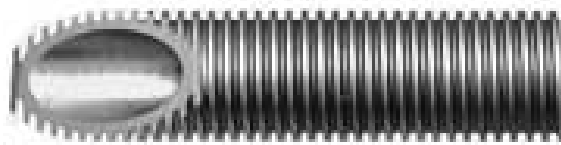
Voor de warmteoverdracht tussen twee media met een afwijkende warmteoverdrachtscoëfficiënt kan gekozen worden om het warmtewisselend oppervlak zodanig aan te passen dat geldt:

$$\alpha_i A_i = \alpha_o A_o.$$

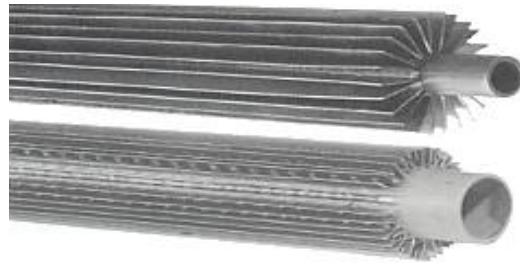
Tabel 7.2 *Overzicht kentallen en limieten gevinde buizen*

|                     |                                 | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> | <i>Opmerking</i> |
|---------------------|---------------------------------|----------------|----------------|------------------|
| Afmetingen          |                                 |                |                |                  |
| • hoogte            | mm                              |                | 15             |                  |
| • pitch             | fpi                             | 5              | 36             |                  |
| • diameter inwendig | mm                              | 8              | 38             |                  |
| Uitwendig oppervlak | m <sup>1</sup> /m <sup>2</sup>  | 0,1            | 2,22           |                  |
| Materiaal           | Koper, aluminium, titanium, ... |                |                |                  |

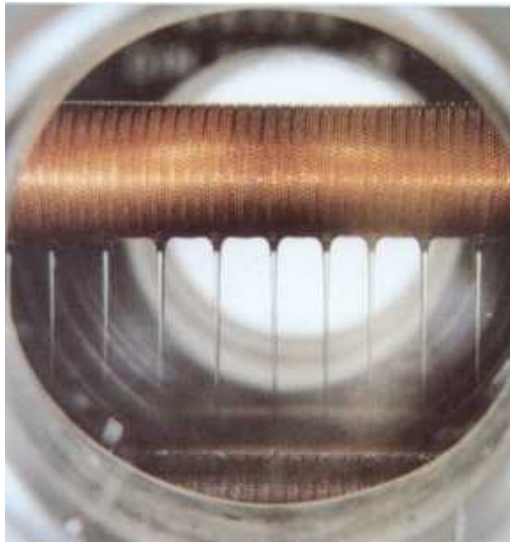
Voor verdamperen en condensoren is het gunstig om gebruik te maken van gegroefde buizen. Voorbeelden van merknamen zijn: Wieland GEWA-TW<sup>TM</sup> (Figuur 7.1) en Hitachi Thermoexcel-E of C<sup>TM</sup>.



Figuur 7.1 *GEWA gevinde buizen van Wieland*



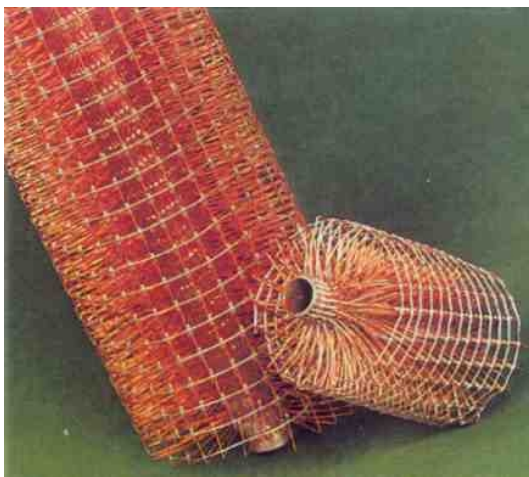
Figuur 7.2 *Axiale vinnen (Brown Fintubes)*



Figuur 7.3 *Gegroefde buis voor condensatie*



Figuur 7.4 *Gegroefde buis voor verdamping*



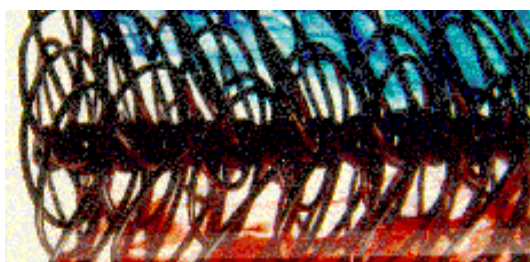
Figuur 7.5 *Assortiment van Spirotech*



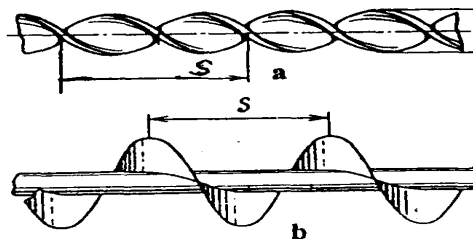


## 7.2 Modificatie stroming in buis

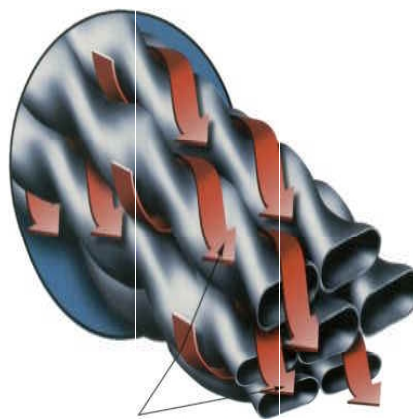
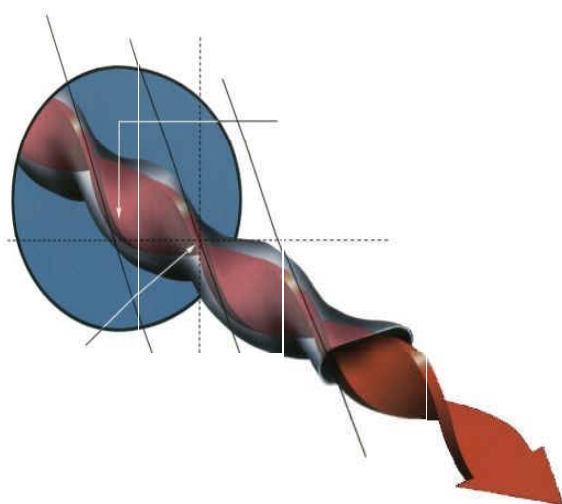
De meeste principes voor verbetering van de warmteoverdracht zijn gebaseerd op het mixen van de processtroom. Hiermee wordt de maximale verblijftijd verkleind. De gemiddelde verblijftijd blijft gelijk, alleen de spreiding neemt af. Dit resulteert zowel in een verbeterde warmteoverdracht als een daling van de vervuiling. Hiervoor zijn verschillende typen 'inserts' ontwikkeld met een verbetering van de warmteoverdracht tot 50 % met slechts een stijging van kosten van 10 % (zie Figuur 7.6 en Figuur 7.7). Ook is het mogelijk om de gehele buis te torderen zodat zowel binnen als buiten de buis een turbulente stroom ontstaat (Figuur 7.8). Volgens opgave fabrikant ligt de warmteoverdracht 40 % hoger.



Figuur 7.6 Draad matrix buis inwendig (Cal Gavin Limited/Hitran)



Figuur 7.7 Voorbeelden van 'twisted tape' (boven) en schroef spiraal (onder)

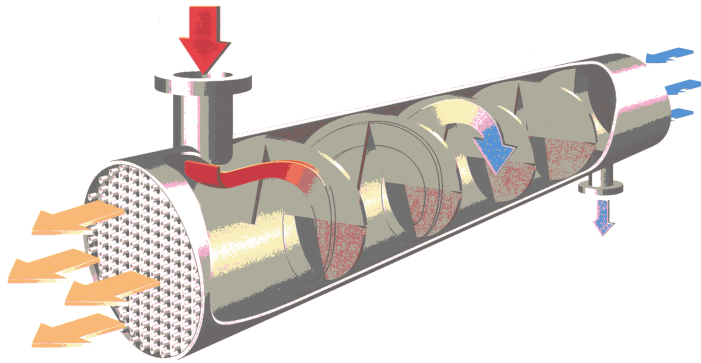


Figuur 7.8 'Twisted Tube™' warmtewisselaar; inwendige stroming (links) en externe stroming in pijpenbundel (rechts) Brown Fintubes

Berekening van warmteoverdracht van twisted tape: Berles, A.E, Augmentation of heat transfer, (par 2.5.11) in: Heat Exchanger Design Handbook (HEDH), 1998.

## 7.3 Gemodificeerde keerschotten

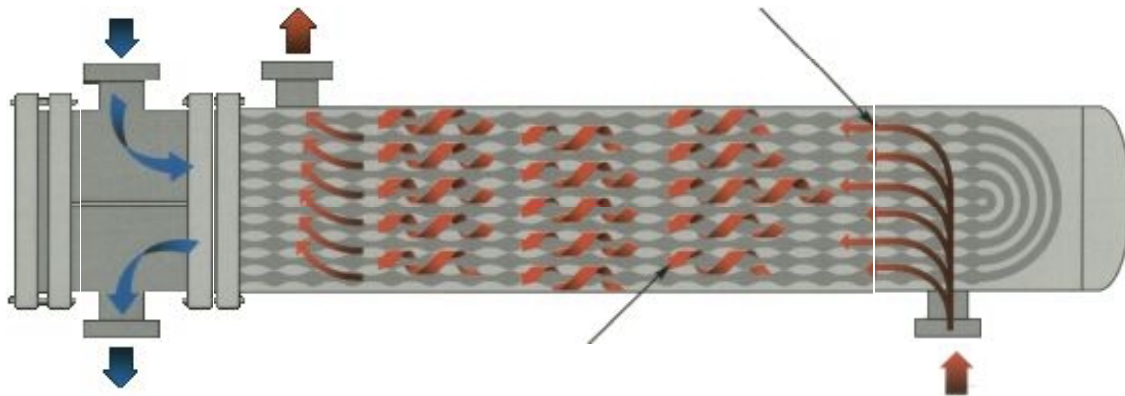
Er zijn twee bekende methoden om de keerschotten in 'Shell & Tube' warmtewisselaars te verbeteren. Dit kan enerzijds door de keerschotten te perforeren. Hierdoor neemt de werveling in de stroming sterk toe. Anderzijds is het mogelijk de keerschotten niet loodrecht op de stroming te plaatsen maar schroefvormig. Hierdoor daalt de spreiding in de verblijftijd wat een gunstig effect heeft op de gemiddelde warmteoverdracht en de vervuiling.



Figuur 7.9 *Schroefvormige keerschotten*

Tabel 7.3 *Voor- en nadelen van warmtewisselaars met 'inserts' of gemodificeerde keerschotten*

| <i>Voordelen:</i>             | <i>Nadelen:</i>        |
|-------------------------------|------------------------|
| Voorkomt vervuiling           | Beperkte extra drukval |
| Intensievere warmteoverdracht | Constructiekosten      |



Figuur 7.10 *Een keerschotten vrije 'Shell & Tube' warmtewisselaar gebruikmakend van 'Twisted Tubes' die elkaar ondersteunen*



## 8. SELECTIE TYPE WARMTEWISSELAAR

Voor het selecteren van een geschikt type warmtewisselaar voor een specifieke toepassing is het eenvoudiger om aan de hand van de randvoorwaarden de beschikbare typen warmtewisselaars te filteren in plaats dat via een soort stappenplan het juiste type wordt geselecteerd. De selectiecriteria voor een warmtewisselaar zijn namelijk niet zwart-wit genoeg om een beslisboom op te zetten. Naast Tabel 8.3 met een totaal overzicht van de belangrijkste typen warmtewisselaars is het handig om van reeds bestaande software gebruik te maken (zie Bijlage B). Een deel van de software is echter vrijwel volledig gericht op het assortiment van het eigen merk.

Tabel 8.1 *Selectiecriteria voor warmtewisselaars*

|                  |
|------------------|
| 1) Temperatuur   |
| 2) Druk          |
| 3) Drukval       |
| 4) Vervuiling    |
| 5) Vermogen      |
| 6) Kosten        |
| a) Kapitaal      |
| b) Installatie   |
| c) Pompverliezen |
| d) Onderhoud     |
| 7) Ervaring      |
| 8) Compactheid   |

Om enig inzicht te krijgen in welke typen warmtewisselaars waar worden gebruikt, is in Tabel 8.2 voor diverse takken van industrie een lijst van toegepaste warmtewisselaars weergegeven. De standaard 'Shell & Tube' warmtewisselaar wordt niet weergegeven in de tabel. Met name in de Verenigde Staten wordt deze nog op grote schaal toegepast in vrijwel alle takken van industrie. In Nederland is ook een groot aantal constructiebedrijven die 'Shell & Tube' warmtewisselaars fabriceren. Dit type warmtewisselaar wordt echter steeds vaker vervangen door platen warmtewisselaars.

Tabel 8.2 *Overzicht van welk type warmtewisselaars in welke tak van industrie wordt toegepast (groen) (Reay 1999)*

|                       | Plaat-frame WW | Gesoldeerde plaat WW | Gelaste plaat WW | Spiraal (plaat) WW | Plaat-vin WW | Geprint circuit WW | Marbond | Compact Shell & Tube | Plaat Shell WW | Buizen inwendig |
|-----------------------|----------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------|--------------------|---------|----------------------|----------------|-----------------|
| Industrietak          | PHE            | BPHE                 | WPHE             | SPHE               | PFHE         | PCHE               | Marbond | CSHE                 | PSHE           |                 |
| (Petro)chemie         |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Cryogeen              |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Levensmiddelen        |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Papier en karton      |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Textiel en weefsels   |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Olie en gas productie |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Verf en lakken        |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Koeling               |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Lucht compressie      |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |
| Mech. Damp compressie |                |                      |                  |                    |              |                    |         |                      |                |                 |

Tabel 8.3 *Totaal overzicht van kentallen voor de belangrijkste typen warmtewisselaars* (Shah 1997) (Thonon 2000) (Hesselgreaves 2001)

|                           | Max. temperatuur<br>(°C) | Max. druk<br>(bar) | Drukval | Vervuiling                            | Vermogen                                         |                             | Kosten               |                                 | Ervaring           | Compactheid<br>(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------|--------------------------|--------------------|---------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|
|                           |                          |                    |         | Geschikt voor<br>vervuilende<br>media | Prestatie <sup>24</sup><br>(MW/m <sup>3</sup> K) | U25<br>(W/m <sup>2</sup> K) | Kapitaal<br>(f/kW K) | Kapitaal<br>(f/m <sup>2</sup> ) |                    |                                                  |
| <i>Platen</i>             |                          |                    |         |                                       |                                                  |                             |                      |                                 |                    |                                                  |
| • frame                   | 160-200                  | 20-25              |         | Ja                                    | 0,7-5                                            | 5.11026                     | 100                  | 350-700                         | Veel <sup>27</sup> | 150-250                                          |
| • gesoldeerd              | 200                      | 30                 |         | Nee                                   | 0,7-5                                            | 3.457-10.000                |                      |                                 |                    | ±200                                             |
| • gelast                  | 300-400                  | 30-40              |         | Ja/nee                                |                                                  | 1.518-9.100                 | 515                  |                                 |                    | ±200                                             |
| • spiraal                 | 400                      | 30                 |         | Ja                                    |                                                  |                             |                      |                                 | Ja                 |                                                  |
| • plaat-vin               |                          |                    |         | Nee                                   |                                                  |                             |                      |                                 | Ja                 |                                                  |
| – aluminium               | 70-200                   | 80-120             |         |                                       | 2,8-10                                           | 4.000-5.000                 |                      |                                 |                    | 1000-1500                                        |
| – 28                      | 650                      | 80                 |         |                                       |                                                  |                             |                      |                                 |                    | 700-2000                                         |
| – RVS                     | 1300                     | 4                  |         |                                       |                                                  |                             |                      |                                 |                    |                                                  |
| – keramisch               |                          |                    |         |                                       |                                                  |                             |                      |                                 |                    |                                                  |
| • geprint circuit         |                          |                    | hoog    |                                       | 0,2-15                                           | 1.090-3.230                 | 1400                 |                                 | Weinig             | 200-5000                                         |
| • poreus matrix           | 800                      | 1000               |         | Nee                                   |                                                  |                             |                      |                                 | Weinig             |                                                  |
| <i>'Shell &amp; Tube'</i> |                          |                    |         |                                       |                                                  |                             |                      |                                 |                    |                                                  |
| • standaard               |                          |                    |         |                                       | 0,1-0,8                                          | 1.70029                     | 500                  | 270-1100                        | Veel               | 50-200                                           |
| • compact                 |                          |                    |         |                                       |                                                  | 938                         |                      |                                 | Ja                 | 400-500                                          |
| • shell & plaat           | 300-400                  | 30-40              |         | Ja/nee                                |                                                  |                             |                      |                                 | Ja                 |                                                  |
| <i>Overige WW</i>         |                          |                    |         |                                       |                                                  |                             |                      |                                 |                    |                                                  |
| • heat pipe WW            |                          |                    |         |                                       | 7,230                                            |                             |                      |                                 | Ja                 |                                                  |
| • mini-spiraal            |                          |                    |         |                                       |                                                  |                             |                      |                                 | Veel               |                                                  |
| • gevinde buis            | 200                      | 200                |         | Nee                                   |                                                  |                             |                      |                                 | Veel               |                                                  |

24 Wordt berekend uit het product van de effectiviteit en de totale warmteoverdracht coëfficiënt U

25 Uitgaande van water-water

26 Alfa-hot = Alfa-cold = 11300; (Bailey 1999)

27 Geldt voor Europa, ervaring in Verenigde Staten beperkt

28 Voor een auto-radiator geldt een waarde van 30-200 kW/m<sup>3</sup> K

29 Alfa-hot = 5100; Alfa-cold = 4700; (Bailey 1999)

30 Q/dT (kW/K)

## REFERENTIES

- Bailey, A. (1999): *Improving heat exchanger reliability with heat transfer enhancement*, 1999.
- Bakker, R. (2001): *Proces intensificatie bij DSM; ontwerpmethodologie van zeer efficiënte chemische fabrieken - NPT Procestechnologie*, maart - april, 2001.
- Carp, A. C. L. A. (1999): *Markt- en literatuuronderzoek HEX-reactoren*, ECN, Petten, - The Netherlands, 1999.
- DACE (1999): *Dace prijzenboekje; kostengegevens t.b.v. ramingen*, 1999.
- Faghri, A. (1995): *Heat pipe science and technology*, Taylor & Francis, Bristol, United Kingdom, 1995.
- Hesselgreaves, J. E. (2001): *Compact heat exchangers; Selection, design and operation*, Pergamon, 2001.
- IEA, C. (1996): *Saving energy with compact heat exchangers*, 1996.
- Laval, A. (2001): [www.alfalaval.com/thermal](http://www.alfalaval.com/thermal), 2001.
- Perry, R. H. (1997): *Perry's chemical engineers' handbook*, 1997.
- Reay, D. (1999). *Learning from experience with compact heat exchangers*. CADDET analyses series No. 25. Sittard, 1999.
- Shah, R. K. (1997): *Compact heat exchangers for the process industries*, 1997.
- Thonon, B. (2000): *Heat equipments for the process, power and refrigeration industries*, 2000.
- VDI (1997): *VDI-Wärmeatlas; Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*, Springer, 1997.
- Walpot, J.: *Betere producten door een aangescherpt proces*. NPT procestechnologie, maart-april 2001, 42-43.
- Yoshizawa, Y.: *Thermal analysis of a magnesium oxide/water chemical heat pump for cogeneration*. Applied Thermal Engineering 21 (10): 1067-1081.



## LIJST VAN AFKORTINGEN

|       |                                                          |                                     |
|-------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| BPHE  | Brazed Plate Heat Exchanger                              | Gesoldeerde plaat warmtewisselaar   |
| $D_h$ | Hydraulische diameter                                    |                                     |
| $dT$  | Temperatuurverschil tussen primaire en secundaire medium |                                     |
| PCHE  | Printed-Circuit Heat Exchanger                           | Geprint circuit warmtewisselaar     |
| PFHE  | Plate-Fin Heat Exchanger                                 | Plaat-vin warmtewisselaar           |
| PMHE  | Porous Matrix Heat Exchanger                             | Poreuze matrix warmtewisselaar      |
| PSHE  | Plate & Shell Heat Exchanger                             | Plaat en mantel warmtewisselaar     |
| Q     | Warmtestroom                                             |                                     |
| $R_f$ | Vervuilingsweerstand                                     |                                     |
| RVS   | Roest Vast Staal                                         |                                     |
| SHE   | Spiral-plate Heat Exchanger                              | Spiraal plaat warmtewisselaar       |
| STHE  | Shell-and-Tube Heat Exchanger                            | Compacte bundelpijp warmtewisselaar |
| U     | Warmteoverdrachtscoëfficiënt                             |                                     |
| VO    | Verwarmd Oppervlak of<br>Warmte-uitwisselend oppervlak   |                                     |
| WPHE  | Welded Plate Heat Exchanger                              | Gelaste plaat warmtewisselaar       |
| WW    | Warmtewisselaar                                          |                                     |

Vooraf aan de relaties en vergelijkingen in Bijlage C staat nog een lijst met afkortingen welke gebruikt worden in de formules van de betreffende bijlage.



## BIJLAGE A BEDRIJVEN

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><i>Alfa Laval Thermal Ltd</i><br/> Theta house<br/> Doman Road<br/> Camberley GU15 3DN<br/> <a href="http://www.alfalaval.com">http://www.alfalaval.com</a></p>                                                                                                                                                                                                  | <p>PFHE, BPHE, WPHE, SHE</p>                                                                                               |
| <p><i>van der Beyl B.V.</i><br/> Ridderkerkstraat 27<br/> 3076 JT Rotterdam<br/> Postbus 9522<br/> 3007 AM Rotterdam<br/> Tel.: 010 - 432 22 22<br/> Fax: 010 - 419 90 36<br/> Email: <a href="mailto:info@vanderbeyl.nl">info@vanderbeyl.nl</a><br/> <a href="http://www.vanderbeyl.nl/">http://www.vanderbeyl.nl/</a></p>                                         |                                                                                                                            |
| <p><i>Bloksma BV Heat Exchangers</i><br/> Draaibrugweg 15<br/> 1332 AB Almere<br/> Tel: 036 5492300<br/> Fax: 036 5492390<br/> <a href="http://www.bloksma.nl">http://www.bloksma.nl</a></p>                                                                                                                                                                        | <p>STHE</p>                                                                                                                |
| <p><i>Bronswerk Heat Transfer BV</i><br/> Stationsweg 22,<br/> 3862 CG Nijkerk<br/> Postbus 92, 3860 AB Nijkerk<br/> Tel: (+31) 33-2472500<br/> Fax: (+31) 33-2452338<br/> Email: <a href="mailto:info@bronswerk.nl">info@bronswerk.nl</a><br/> <a href="http://www.bronswerk.nl/">http://www.bronswerk.nl/</a></p>                                                 | <p>Maximaal 1000 bar en –196 tot &gt; 800 °C<br/> Shell &amp; Tube WW; luchtcoolers; A-frame<br/> condensors; branders</p> |
| <p><i>Brown Fintube®</i><br/> 12602 FM 529<br/> Houston, TX 77041<br/> Tel: 713/466-3535<br/> Fax: 713/466-3701<br/> <a href="http://www.brownfintube.com">http://www.brownfintube.com</a></p>                                                                                                                                                                      | <p>‘Twisted tape’, tube inserts</p>                                                                                        |
| <p><i>Cal Gavin Limited</i><br/> Minerva Mill Technology Centre<br/> Station Road,<br/> Alcester, Warwickshire,<br/> B49 5 ET, England<br/> Tel: +44 (0)1789 400 401<br/> Fax: +44(0)1789 400 411<br/> Email: <a href="mailto:ian.gibbard@calgavin.co.uk">ian.gibbard@calgavin.co.uk</a><br/> <a href="http://www.calgavin.co.uk">http://www.calgavin.co.uk</a></p> | <p>Tube inserts</p>                                                                                                        |
| <p><i>Cetetherm AB</i><br/> P O Box 60<br/> S-37221 Ronneby, Sweden<br/> Tel: + 46 457 755 00<br/> Fax: + 46 457 668 30</p>                                                                                                                                                                                                                                         | <p>PHE, S&amp;T</p>                                                                                                        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><i>Enalco</i><br/> Aartsdijkweg 67<br/> 3155 RR Maasland<br/> Tel: (+31) 174 510155<br/> Fax: (+31) 174 517699  <br/> Email: <a href="mailto:enalco@enalco.nl">enalco@enalco.nl</a><br/> <a href="http://www.enalco.nl/nl/industrial/index-heat.htm">http://www.enalco.nl/nl/industrial/index-heat.htm</a></p> | <p>Warmtewisselaars voor tuinbouw; wkk's<br/> Rookgaskoelers<br/> Condensors</p>                                                                                    |
| <p><i>Geurts International BV</i><br/> Verlengde hoge Klei 18<br/> 2242 NS Wassenaar<br/> Postbus 2039 2240 CA Wassenaar<br/> Tel: 070 5123300<br/> Fax: 070 5145705<br/> <a href="http://geurts.webjump.com">http://geurts.webjump.com</a></p>                                                                   | <p>Warmtewisselaars voor diverse industrieën;<br/> maximaal 7000 bar en 1200 °C<br/> Platen WW, Shell &amp; Tube WW, spiraal in<br/> schelp WW, grafiet-blok WW</p> |
| <p><i>Heat engineering BV</i><br/> Ketelweg 45<br/> 3356 LD Papendrecht<br/> Tel: +31 (0)78 6428229<br/> Fax : +31 (0)78 6428231<br/> Email: <a href="mailto:heat.engineering@worldonline.nl">heat.engineering@worldonline.nl</a></p>                                                                             |                                                                                                                                                                     |
| <p><i>Heat Transfer Consultants, Inc.</i><br/> Phone: USA – (925) 827-9689<br/> Email: <a href="mailto:info@htcssoftware.com">info@htcssoftware.com</a><br/> Website: <a href="http://www.htcssoftware.com">www.htcssoftware.com</a></p>                                                                          | <p>Software</p>                                                                                                                                                     |
| <p><i>Heat Transfer Systems, Inc.</i><br/> 'Save Energy for Tomorrow'<br/> 8100 Polk St.<br/> St. Louis, MO 63111<br/> Tel: (314) 631-3311<br/> Fax: (314) 631-3399<br/> Email: <a href="mailto:akwong@heattransfersys.com">akwong@heattransfersys.com</a></p>                                                    |                                                                                                                                                                     |
| <p><i>Heatric Ltd</i><br/> Holton Road 46<br/> Poole, Dorset BH16 6 LT, UK<br/> Tel: 012020627 000<br/> Fax: 01202 632 299</p>                                                                                                                                                                                    | <p>PCHE</p>                                                                                                                                                         |
| <p><i>Helpman BV</i><br/> Postbus 44<br/> 9700 AA Groningen<br/> Tel: 050 5217 555<br/> Fax: 050 5264 878<br/> Email: <a href="mailto:info@helpman.com">info@helpman.com</a><br/> <a href="http://www.helpman.nl/">http://www.helpman.nl/</a></p>                                                                 |                                                                                                                                                                     |
| <p><i>HRS</i><br/> 10-12 Caxton Way<br/> Watford Business Park, Watford<br/> Hertfordshire, WD18 8TX<br/> Tel: +44 (0)1923 232335<br/> Fax: +44 (0)1923 230266</p>                                                                                                                                                | <p>PHE, STHE, boilers,</p>                                                                                                                                          |



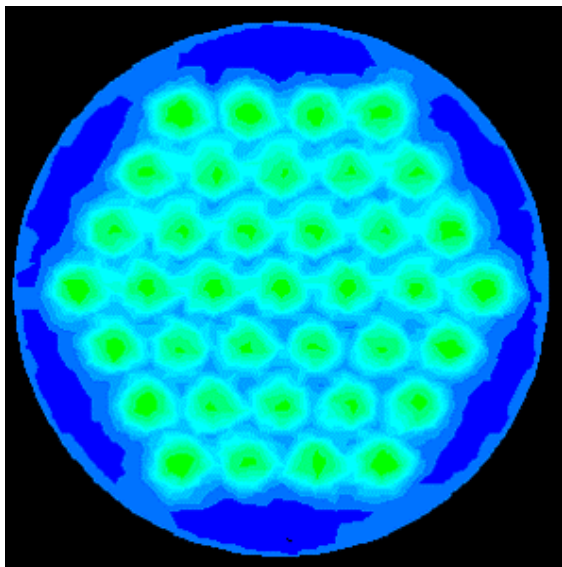
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <p><i>OLAER NEDERLAND</i><br/> De Lind – P.O. BOX 75<br/> NL – 4840 AB Prinsenbeek<br/> Tel: 31(76) 541 24 53<br/> Fax: 31(76) 541 15 02<br/> Email: <a href="mailto:info@olaer.nl">info@olaer.nl</a><br/> <a href="http://www.olaer.nl/no8n.htm">http://www.olaer.nl/no8n.htm</a></p>                            | Luchtkoelers                                         |
| <p><i>Radscan Intervex AB</i><br/> Zweden<br/> Email: <a href="mailto:radscan@radscan.se">radscan@radscan.se</a><br/> <a href="http://www.radscan.se">http://www.radscan.se</a></p>                                                                                                                               | Spiraal WW                                           |
| <p><i>Serck Aviation Ltd.</i><br/> Oscar House Wharfdale Road<br/> Tyseley Birmingham B11 2DG<br/> Tel: +44 (0)121 623 6000<br/> Fax: +44 (0)121 623 6100<br/> Email: <a href="mailto:sales@serck-aviation.com">sales@serck-aviation.com</a><br/> <a href="http://www.serck.co.uk">http://www.serck.co.uk</a></p> | PFHE, compact S&T                                    |
| <p><i>SWEP Ltd</i><br/> Chobham Ridges, The Maultway<br/> Camberley, Surrey GU15 1QE, UK<br/> Tel 01276 64221<br/> Fax: 01276 64344</p>                                                                                                                                                                           | PFHE, BPHE                                           |
| <p><i>Transfer Inc</i><br/> Texas<br/> <a href="http://www.transfer.com">Http://www.transfer.com</a></p>                                                                                                                                                                                                          |                                                      |
| <p><i>Unifin International</i><br/> 1030 Clarke Road<br/> London, ON. Canada. N6A-4P4<br/> Tel: 519/451-0310 / 800/567-5707<br/> Fax: 519/451-1732<br/> Email: <a href="mailto:unifin@kochind.com">unifin@kochind.com</a></p>                                                                                     |                                                      |
| <p><i>Wieland Werke AG</i><br/> 89070 Ulm<br/> <a href="http://www.wieland.com">http://www.wieland.com</a></p>                                                                                                                                                                                                    | Gevinde buizen; spiraal warmtewisselaars, verdampers |
| <p><i>Wybenga BV</i><br/> Burgemeester Hondelinkstraat 3<br/> 4153 C Beesd</p>                                                                                                                                                                                                                                    | PSHE                                                 |



## BIJLAGE B SOFTWARE

- *FLUENT*

Computer Simulation Facilitates Ninefold Improvement In Heat Exchanger Efficiency<sup>31</sup>



Figuur B.1 *Stromingspatroon 'Shell & tube' in FLUENT*

- *CHEX (Comparative Heat Exchanger Design Program)*

Zeer eenvoudig programma in DOS. Vergelijking compacte warmtewisselaars met 'shell & tube' warmtewisselaars. Gratis verkrijgbaar.

- *HEAd (Heat Exchanger Advisor)*<sup>32</sup>

Selectie van beste type warmtewisselaar. Kijkt naar kosten, vervuiling, drukval, materiaal en constructie. Een vergelijking van meerdere alternatieven is mogelijk. Het pakket is op lease basis beschikbaar.

- *Alfa Laval HVAC&R Selection Tools*

Op internet beschikbaar programma voor selectie van een breed pakket aan warmtewisselaars. Tevens bestaat de mogelijkheid om bijbehorende AutoCad tekeningen te downloaden.

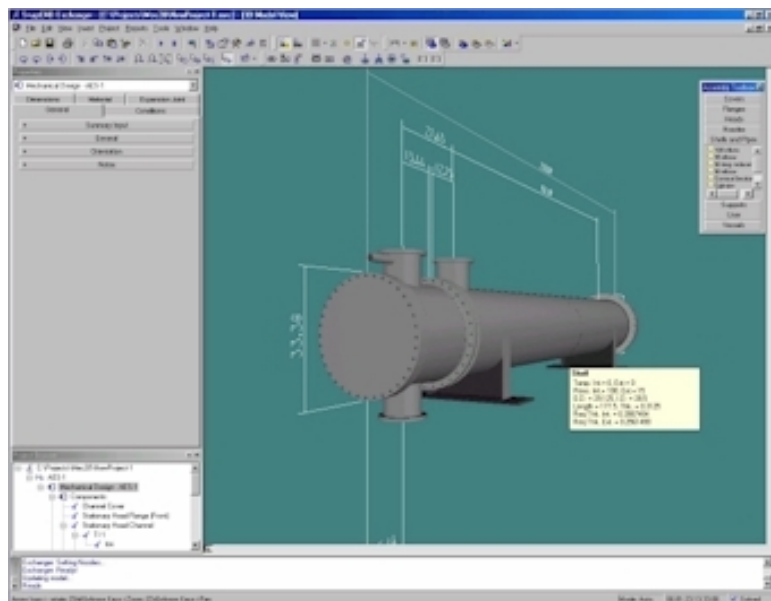
- *SnapCAD Exchanger*<sup>®</sup>

Geschikt voor het ontwerp van alle types 'Shell & Tube' warmtewisselaars. Sluit aan op AutoCAD. Maakt stukslijsten en kostencalculaties.

---

<sup>31</sup> By Peter Ellerby, Engineering Manager, Cal Gavin Limited, Birmingham, United Kingdom

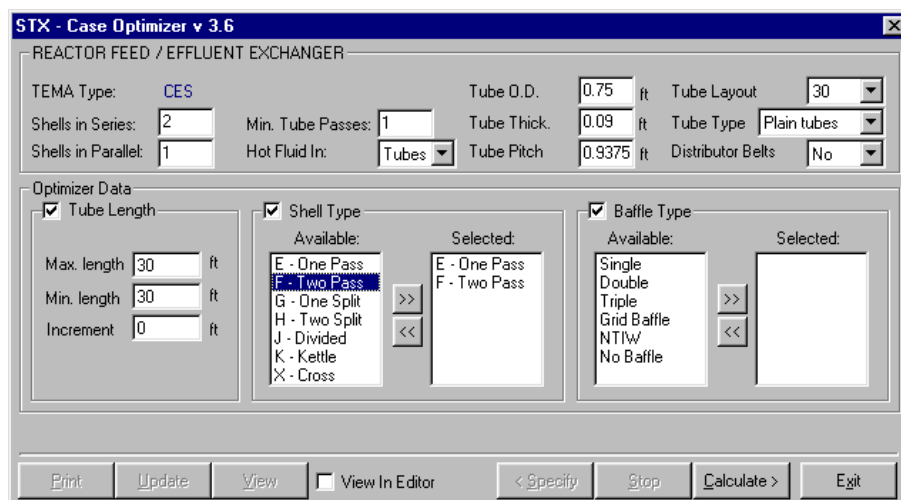
<sup>32</sup> Uitgegeven door HTFS, Oxfordshire [Reay, 1998 #16]



Figuur B.2 Ontwerp 'Shell & Tube' in SnapCAD

- *STX for Windows*

Geschikt voor alle types 'Shell & Tube' berekeningen, inclusief gebruik van 'Twisted tape' en drukvalberekeningen. Zowel enkele fase vloeistof, verdampers en condensors.



Figuur B.3 Ontwerp 'Shell & Tube' in STX

## BIJLAGE C FORMULES

### • *Lijst met symbolen*

| <i>Symbool</i> | <i>Eenheid</i>      | <i>Beschrijving</i>                                 |
|----------------|---------------------|-----------------------------------------------------|
| A              | m <sup>2</sup>      | Warmtewisselend oppervlak                           |
| $\hat{a}$      | m                   | Amplitude van sinusvormig golfpatroon van een plaat |
| C              | W/K                 | Warmtestroom                                        |
| cp             | J/kg K              | Soorlijke warmte                                    |
| d <sub>h</sub> | m                   | Hydraulische diameter                               |
| f              |                     | Wrijvingsfactor                                     |
| G              | kg/s m <sup>2</sup> | Massasnelheid                                       |
| h              | W/m <sup>2</sup> K  | Lokale warmteoverdrachts coëfficiënt                |
| j              | -                   | Colburn getal of j-factor                           |
| k              | W/m K               | Warmtegeleiding                                     |
| L              | m                   | Lengte                                              |
| m              | kg/s                | Massastroom                                         |
| Np             | -                   | Aantal passages                                     |
| NTU            | -                   | Aantal overdrachts stappen                          |
| Nu             | -                   | Nusselt getal                                       |
| P              | -                   | Druk (drukval)                                      |
| Pr             | -                   | Prandtl                                             |
| q              | W                   | Thermisch vermogen                                  |
| Re             | -                   | Reynold                                             |
| T              | K of °C             | Temperatuur                                         |
| U              | W/m <sup>2</sup> K  | Totale warmteoverdrachts coëfficiënt                |
| V              | m <sup>3</sup> /s   | Debiet                                              |
| w              | m                   | Breedte plaat tussen de pakkingen                   |
| W              | kg/s                | Massastroom                                         |

### *Griekse symbolen*

| <i>Symbool</i> | <i>Eenheid</i>     | <i>Beschrijving</i>                                                                            |
|----------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$       | W/m <sup>2</sup> K | Lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt                                                            |
| $\rho$         | kg/m <sup>3</sup>  | Dichtheid                                                                                      |
| $\Phi$         | -                  | Vlakvergrotingfactor = $\Phi$ de verhouding van de golven tot de projecties in het platte vlak |
| $\Lambda$      | m                  | golflengte                                                                                     |
| $\epsilon$     | -                  | Effectiviteit                                                                                  |
| $\sigma$       |                    | oppervlakte porositeit                                                                         |
| $\lambda$      | W/m K              | Warmtegeleiding                                                                                |
| $\eta$         |                    | Effectiviteit van oppervlak                                                                    |

### Subscripten

| <i>Symbol</i> | <i>Beschrijving</i>                |
|---------------|------------------------------------|
| c             | Cold (koude stroom)                |
| h             | Heat (warme stroom)                |
| in            | Ingaande stroom                    |
| ln            | Logaritmisch (temperatuurverschil) |
| m             | Mean (temperatuur)                 |
| max           | Maximaal                           |
| min           | Minimaal                           |
| uit           | Uitgaande stroom                   |

### • Ontwerp platenwarmtewisselaars

Uit (Perry 1997) volgt de relatie voor het Nusselt getal:

$$Nu = \frac{hd_h}{k} = 0,28Re^{0,55} Pr^{0,4} \quad \text{Vgl. 1}$$

waarbij de hydraulische diameter  $d_h$  gelijk wordt genomen aan twee keer de diepte van een enkele plaat ribbel.

De drukval volgt uit:

$$\Delta P = \frac{2fG^2L}{g\rho d_h} \quad \text{Vgl. 2}$$

met  $L$  = lengte van de plaat

$$f = 2,5 \left( \frac{Gd_h}{\mu} \right)^{-0,3} \quad \text{Vgl. 3}$$

en  $G$  (de massa snelheid in  $\text{kg/s m}^2$ ) gedefinieerd als:

$$G = \frac{W}{N_p w d_h} \quad \text{Vgl. 4}$$

$w$  = breedte van de plaat tussen de pakkingen

$N_p$  = aantal passages = (aantal platen – 1)/2

$$NTU = \frac{\Delta T_{\text{uitkoeling}}}{\Delta T_{\text{ln}}} \approx (0,5 - 4,0) \quad \text{Vgl. 5}$$

In de (VDI 1997) wordt de hydraulische diameter bepaald door

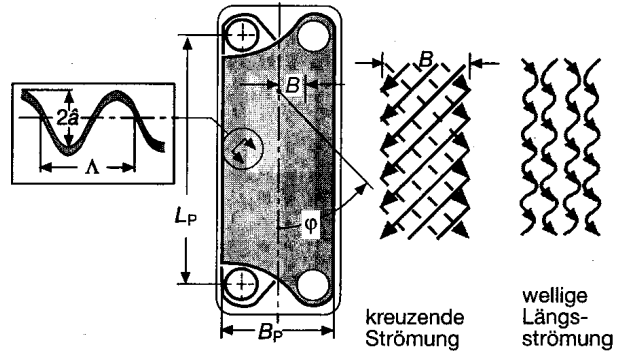
$$d_h = 4 \frac{\hat{a}}{\Phi} \quad \text{Vgl. 6}$$

Waarbij  $\hat{a}$  de amplitude van de sinusvormige golfpatroon en  $\Phi$  de verhouding van de golven tot de projecties in het platte vlak (vlakvergrotingfactor). Deze factor is tevens een functie van het golfgetal  $X$ :

$$X = 2\pi \frac{\hat{a}}{\Lambda} \quad \text{Vgl. 7}$$

waar  $\Lambda$  de golflengte is.

Figuur C.1 Tekening afmetingen en ontwerp platen warmtewisselaar



De vlakvergrotingsfactor kan met een kleine integratiefout berekend worden uit:

$$\Phi(X) \approx \frac{1}{6} \left( 1 + \sqrt{1 + X^2} + 4\sqrt{1 + \frac{X^2}{2}} \right) \quad \text{Vgl. 8}$$

De warmteoverdrachtscoëfficiënt is gelijk aan:

$$\alpha = \frac{q}{A_p \Delta T_m} \quad \text{Vgl. 9}$$

met een correctie voor het oppervlak van de plaat tgv. de golven.

$$A_p = \Phi A_e \quad \text{Vgl. 10}$$

De relatie voor het Nusselt getal volgt volgens L  veque uit:

$$Nu = 1,615 \left( \left[ 4f \frac{Re}{64} \right] Re Pr \frac{d_h}{L} \right)^{1/3} = 0,4038 \left( 4f Re^2 Pr \frac{d_h}{L} \right)^{1/3} \quad \text{Vgl. 11}$$

met L de afstand tussen twee kruispunten:

$$\frac{d_h}{L} = \frac{d_h}{\Lambda} \sin(2\varphi) \text{ met } (0 < \varphi < 90^\circ) \quad \text{Vgl. 12}$$

De drukval is afhankelijk van de stromingshoek:

|                        | $\varphi = 0^\circ$                                                                          | $\varphi = 90^\circ$ (waarden geldig voor $\Lambda/\hat{a} = 4$ )                                                        |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Re<2000<br>(laminair)  | $f_0 = \frac{1}{4} \frac{B_0}{Re} \approx \frac{1}{4} \frac{64}{Re} = \frac{16}{Re}$ Vgl. 13 | $f_1 = \frac{a}{4} \left( \frac{B_1}{Re} + C_1 \right) \approx \frac{a}{4} \left( \frac{597}{Re} + 3,85 \right)$ Vgl. 14 |
| Re>2000<br>(turbulent) | $f_0 = \frac{1}{4} [1,8 \lg Re - 1,5]^{-2}$ Vgl. 15                                          | $f_1 = \frac{a}{4} \frac{K_1}{Re^n} \approx \frac{a}{4} \frac{39}{Re^{0,289}}$ Vgl. 16                                   |

Uit deze twee limietgevallen kan de werkelijke drukval worden berekend:

$$\frac{1}{\sqrt{4f}} = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{b \tan \varphi + c \sin \varphi + 4f_0 \frac{Re}{\cos \varphi}}} + \frac{1 - \cos \varphi}{\sqrt{4f_1 Re}} \quad \text{Vgl. 17}$$

oftewel

$$f = 2 \left[ \frac{\cos \varphi}{\sqrt{b \tan \varphi + c \sin \varphi + 4f_0 \frac{Re}{\cos \varphi}}} + \frac{1 - \cos \varphi}{\sqrt{4f_1 Re}} \right]^{-2} \quad \text{Vgl. 18}$$

De empirische constanten a, b en c volgen uit de overige geometrie van de platen warmtewisselaar. Voor  $Re = 2000$  en  $\Lambda/\hat{a}=4$  volgt:  $a = 3,8$ ;  $b=0,18$  en  $c=0,36$ .

- *Ontwerp spiraal-plaat warmtewisselaar*

Uit (Perry, 1997) volgt de relatie voor het Nusselt getal:

$$Nu = \frac{hd_h}{k} = 0,0315 Re^{0,8} Pr^{0,25} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,17} \quad \text{Vgl. 19}$$

Waarbij de hydraulische diameter  $D_h$  gelijk wordt genomen aan 2 keer de spleetruimte tussen de platen.

De drukval volgt uit:

$$\Delta P = \frac{LV^2 \rho}{1,0703E - 03} 1,45 \quad \text{Vgl. 20}$$

- *Epsilon-NTU methode*

De warmtestroom voor de warme en koude zijde is gelijk aan:

$$C_h = \dot{m}_h c_{p,h} \quad \text{Vgl. 21}$$

$$C_c = \dot{m}_c c_{p,c}$$

De minimale en maximale warmtestroom volgt uit:

$$C_{\min} = \min(C_h, C_c) \quad \text{Vgl. 22}$$

$$C_{\max} = \max(C_h, C_c)$$

De verhouding van warmtestromen volgt uit:

$$C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad \text{Vgl. 23}$$

$$C_{\max} = \max(C_h, C_c)$$

De overgedragen warmte in een warmtewisselaar is gelijk aan:

$$Q = C_h (T_{h,in} - T_{h,uit}) = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,in} - T_{h,uit}) \quad \text{Vgl. 24}$$

$$= C_c (T_{c,uit} - T_{c,in}) = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,uit} - T_{c,in})$$

De theoretisch maximaal mogelijke warmteoverdracht is gelijk aan:

$$Q_{\max} = C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad \text{Vgl. 25}$$

De effectiviteit van een warmtewisselaar is nu gelijk aan:

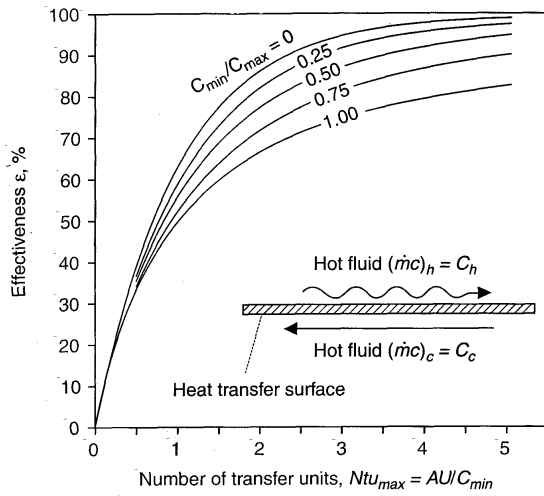
$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{C_h (T_{h,in} - T_{h,uit})}{C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{C_c (T_{c,uit} - T_{c,in})}{C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad \text{Vgl. 26}$$

Het aantal warmte overdracht stappen NTU<sub>33</sub> is gelijk aan:

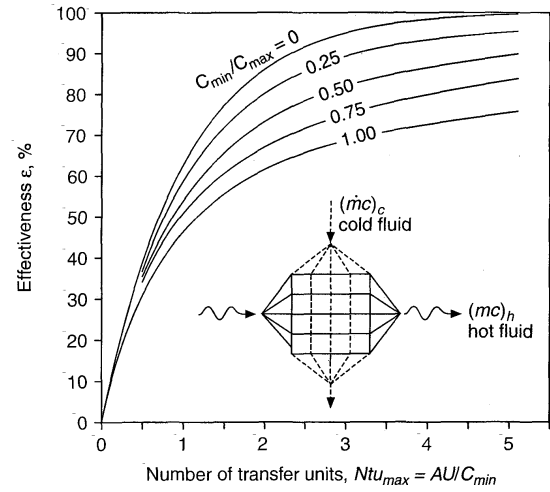
$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad \text{Vgl. 27}$$



Deze waarde is een maat voor de thermische lengte. De effectiviteit is nu een functie van de NTU,  $C^*$  en de stromingsrichting (mee-, tegen- of dwarsstroom). De relatie kan grafisch worden weergegeven (zie Figuur C.2 en Figuur C.3).



Figuur C.2 Effectiviteit van een tegenstroom WW



Figuur C.3 Effectiviteit van een kruis- of dwarsstroom WW

De som van warmteweerstanden kan nu eveneens met de NTU relatie in verband worden gebracht:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{NTU \cdot C_{\min}} = \frac{1}{(\eta_0 \alpha A)_h} + \frac{\delta}{\lambda_0 A_w} + \frac{1}{(\eta_0 \alpha A)_c} \quad \text{Vgl. 28}$$

Waarin  $\eta_0$  de effectiviteit van het oppervlak een waarde heeft in de orde van 0,8. Voor gassen ligt de warmteoverdracht waarde  $\alpha$  in de orde van  $[50-100]$  W/m<sup>2</sup> K en voor vloeistoffen tussen  $[2000-5000]$  W/m<sup>2</sup> K. Hierdoor is het noodzakelijk om bij gas-vloeistof warmtewisselaars aan de gaszijdige kant het warmtewisselend oppervlak te vergroten, bijvoorbeeld met vinnen.

Vgl. 28 kan bij verwaarlozing van de wandweerstand herschreven worden tot:

$$NTU \approx \left( \frac{1}{N_h \frac{C_h}{C_{\min}}} + \frac{1}{N_c \frac{C_c}{C_{\min}}} \right)^{-1} \quad \text{Vgl. 29}$$

Met:

$$N_h = \frac{\eta_0 \alpha_h A_h}{C_h} \quad \text{Vgl. 30}$$

$$N_c = \frac{\eta_0 \alpha_c A_c}{C_c}$$

- *Colburn getal*

Voor turbulente stroom kan de warmteoverdracht worden benaderd voor een groot gebied van Prandtl door de dimensieloze getal van Colburn (of j-factor):

$$j = \frac{Nu}{Re Pr^{1/3}} \quad \text{Vgl. 31}$$

Of:

$$j = \frac{d_h}{4L} Pr^{2/3} N \quad \text{Vgl. 32}$$

Met N gelijk aan:

$$N = \left( \frac{T_{uit} - T_{in}}{\Delta T} \right)_{h,c} \quad \text{Vgl. 33}$$

$\overline{\Delta T}$  is de gemiddelde temperatuur tussen stroom en wand.

Voor het ontwerp van de afmetingen en vorm van de platen kan de parameter  $C_s$  worden berekend door:

$$C_s = \frac{A_s}{\sigma} = \frac{m}{\sigma} \left( \frac{f}{j} \right)^{1/2} \left( \frac{Pr^{2/3} N}{2\rho\Delta p} \right)^{1/2} = \frac{m}{\sigma} \left( \frac{\lambda}{Nu} \right)^{1/2} \left( \frac{Pr N}{2\rho\Delta p} \right)^{1/2} \quad \text{Vgl. 34}$$

Met  $\sigma$  als oppervlakte porositeit.