

De gecombineerde warmteafgiftekarakteristiek

In [1] is een vereenvoudigde rekenmethode gepresenteerd om meer inzicht te krijgen in het deellastgedrag van warmtewisselaars. Hierbij wordt gerekend met een lucht/waterwarmtewisselaar waarbij de luchtuittredetemperatuur constant wordt gehouden, een zogenaamde voorcoeler. In dit tweede artikel wordt dit uitgebreid met een nakoeler, waarbij de luchtintredetemperatuur constant wordt gehouden en de luchtuittredetemperatuur varieert. De beide hieruit voortkomende warmteafgiftekarakteristieken worden vaak, onafhankelijk van elkaar, naast elkaar gebruikt. Aangetoond wordt dat beide warmteafgiftekarakteristieken ook samen gebruikt en in één afbeelding gepresenteerd kunnen worden. Hiermee wordt duidelijk dat te hoge debieten of overdebieten mogelijk zijn, ook voor correct waterzijdig ingeregelde installaties.

Ir. A.H.T.M. (Alet) van den Brink,
Kropman Installatietechniek

Het waterzijdig temperatuurverschil in deellast is afhankelijk van de waterretourconditie en luchtuittredeconditie in de ontwerpsituatie [1,2]. In deel 1 is te lezen hoe voor de vereenvoudigde situatie, het waterzijdig temperatuurverschil in deellast gekoppeld is aan de warmteafgiftekarakteristiek van een zogenaamde voorcoeler. Hierbij varieert de luchtintredetemperatuur en wordt de luchtuittredetemperatuur constant gehouden door de waterzijdige regeling. Via een vergelijkbare methode wordt ook de warmteafgiftekarakteristiek voor een zogenaamde nakoeler afgeleid. De naam nakoeler is ontleent aan [3], waarbij de luchtintredetemperatuur (θ_{ref} [3]) constant is en de luchtuittredetemperatuur varieert. Maar wat zijn nu de verschillen en overeenkomsten, mochten deze er zijn? En wat kun je er dan verder mee? De in [3] weergegeven figuren van de naverwarmer (figuur B.2) en voorverwarmer (figuur B.1) lijken immers

op het eerste gezicht zeer veel op elkaar. In dit artikel wordt duidelijk gemaakt dat er een essentieel onderscheid, maar ook een overeenkomst is tussen beide warmteafgiftekarakteristieken. In de ontwerpfase wordt het onderscheid tussen de voor- en nakoeler veelal gebruikt voor het bepalen van de klepkarakteristiek. Het is ook mogelijk om de kennis van de nakoeler te benutten in de gebruiks- en beheerfase tijdens monitoring van installaties. Zo kunnen hogere debieten dan strikt noodzakelijk, veelal overdebieten genoemd, worden gedetecteerd en gecorrigeerd.

RANDVOORWAARDEN

De randvoorwaarden, behorend bij de afleiding van een nakoeler, worden voor de leesbaarheid kort herhaald. Voor een verdere toelichting wordt verwezen naar [1]:

- massastroom van het water is constant;
- massastroom van de lucht is constant;

- waterintredetemperatuur is constant;
- proces van de lucht is droog koelen of verwarmen;
- warmteoverdracht vindt plaats door middel van zuivere tegenstroom.

De constante luchtuittredetemperatuur is nu niet meer van toepassing maar wordt vervangen door een constante luchtintredetemperatuur.

De volgende genormaliseerde grootheden worden gebruikt.

$$\text{Het vermogen } P^* \equiv P/P_{nom} \quad (1)$$

Hierin zijn P^* [-] het genormaliseerde, dimensieloze vermogen, P [W] het berekende vermogen en P_{nom} [W] het vermogen onder ontwerpcondities.

$$T^*_{uit} \equiv (\theta_{w,uit} - \theta_{w,in,nom}) / (\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,nom}) \quad (2)$$

Hierin zijn T^*_{uit} [-] de genormaliseerde waterretourtemperatuur, $\theta_{w,uit}$ [°C] de waterretourtemperatuur en $\theta_{w,in,nom}$ [°C] de waterintredetemperatuur en $\theta_{w,uit,nom}$ [°C] de

waterretourtemperatuur. De beide laatste onder ontwerpcondities.

$$T^*_{in} = (\theta_{w,in} - \theta_{w,in,nom}) / (\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,nom}) \quad (3)$$

Hierin zijn T^*_{in} [-] de genormaliseerde waterintredetemperatuur en $\theta_{w,in}$ [°C] de waterintredetemperatuur. Volledigheidshalve, $T^*_{in} = 0$ [1] en T^* wordt nu gebruikt om het waterzijdig temperatuurverschil aan te duiden.

$$q^{**}_m = q_m / q_{m,nom} \quad (4)$$

Hierin zijn q^{**}_m [-] de genormaliseerde waterzijdige massastroom, q_m [kg/s] de berekende massastroom en $q_{m,nom}$ [kg/s] de massastroom onder ontwerpcondities. Merk op dat gebruik wordt gemaakt van de notitie q^{**}_m voor de nakoeler (**) en q_m voor de voorkoeler (*). Tenzij anders aangegeven worden de primaire massastromen en temperaturen aangeduid (figuur 1).

■ AFLEIDING

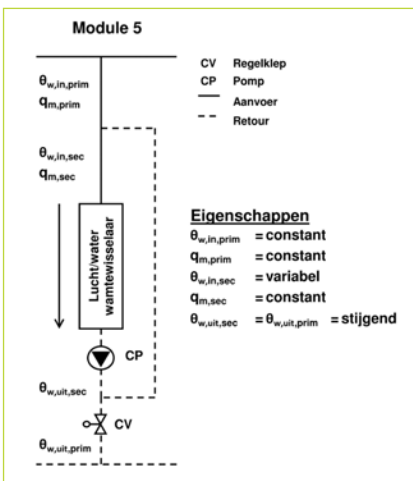
Voor een algemene introductie van de afleiding wordt verwezen naar [1]. Het bijbehorende hydraulisch schema is weergegeven in figuur 1 [4]. De afleiding wordt in verband met de leesbaarheid verzameld in tabel 1.

Uitdrukking (13) laat zien dat het vereenvoudigde waterzijdig temperatuurverschil in deellast geschreven kan worden als een lineaire functie van het vermogen P^* en constanten uit de ontwerpconditie. De afleiding is geldig voor $0 < P^* \leq 1$. Een vermogen $P^* = 0$ resulteert in een gesloten klep en met een ontbrekende massastroom. Als gevolg, er is geen temperatuurverschil aanwezig. Een vermogen $P^* = 1$ resulteert in de ontwerpconditie en hier is de warmtewisselaar waterzijdig op ingeregeld. Deze vergelijking is niet geldig voor een vermogen $P^* > 1$. Vergelijking (13) wordt verkort weergegeven als:

$$T^*(P^*) = c \cdot P^* + d \quad (14)$$

Met:

$$c = (\theta_{(w,uit,nom)} - \theta_{(a,uit,nom)}) / (\theta_{(w,uit,nom)} - \theta_{(w,in,prim,nom)}) \quad (15)$$



-Figuur 1- Hydraulische schema en bijbehorende eigenschappen [4]

Luchtzijdig wordt het vermogen P [W] geschreven als:

$$P = \dot{m}_a \cdot c_a \cdot (\theta_{a,in} - \theta_{a,uit}) \quad (5)$$

Hier is $\dot{m}_a$ [kg/s] is het massadebiet van de lucht, c_a [J/kg.K] de soortelijke warmte van lucht, $\theta_{a,in}$ [°C] de luchtintredetemperatuur en $\theta_{a,uit}$ [°C] de luchtzijdige uittredetemperatuur.

Waterzijdig kan het temperatuurverschil geschreven worden als

$$\Delta T_{w,sec} = \theta_{w,uit,sec} - \theta_{w,in,sec} = \frac{P}{\dot{m}_{w,sec} \cdot c_w} \quad (6)$$

Hierin is $\Delta T_{w,sec}$ [K] het waterzijdige temperatuurverschil aan de secundaire zijde, $\theta_{w,uit,sec}$ [°C] de secundaire retourtemperatuur, $\theta_{w,in,sec}$ [°C] de secundaire waterintredetemperatuur, $\dot{m}_{w,sec}$ [kg/s] de secundaire waterdebiet en c_w [J/kg.K] de soortelijke warmte van water. Uit de ε-NTU methode volgt:

$$\theta_{w,in,sec} = \theta_{a,in,nom} - \frac{P}{\epsilon \cdot C_{min}} \quad (7)$$

Hierin is ϵ [-] de effectiviteit van de warmtewisselaar en C_{min} [W/K] is de kleinste van beide capaciteitsstromen. De waterzijdige uittredetemperatuur $\theta_{w,uit,sec}$ wordt nu gevonden door de secundaire intredetemperatuur $\theta_{w,in,sec}$ uit (7) te verhogen met $\Delta T_{w,sec}$ (6).

$$\theta_{w,uit} = \theta_{a,in,nom} - \frac{P}{\epsilon \cdot C_{min}} + \frac{P}{C_{w,sec}} \quad (8)$$

Hierin is de noemer van de laatste vergelijking herschreven als de capaciteitsflow van het waterzijdig gedeelte $C_{w,sec}$ [W/K]. Zonder overdebiet is de secundaire uittredetemperatuur $\theta_{w,uit,sec}$ [°C] is gelijk aan de primaire uittredetemperatuur $\theta_{w,uit,prim}$ [°C] en wordt verkort geschreven als $\theta_{w,uit}$. De waterretourtemperatuur wordt nu dimensieloos gemaakt door middel van vergelijking (2). Aan beide zijden van het gelijk teken wordt $\theta_{w,in,prim,nom}$ [°C] in mindering gebracht en vervolgens links en rechts gedeeld door het waterzijdig temperatuurverschil ΔT_w van de ontwerpconditie. Nu staat er:

$$\frac{\theta_{w,uit} - \theta_{w,in,prim,nom}}{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,prim,nom}} = \frac{\theta_{a,in,nom} - \theta_{w,in,prim,nom} + P \left(\frac{1}{C_{w,sec}} - \frac{1}{\epsilon \cdot C_{min}} \right)}{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,prim,nom}} \quad (9)$$

Hier is $\theta_{w,uit,nom}$ [°C] de primaire retourwatertemperatuur in ontwerpconditie. Vervolgens wordt de linkerterm van (9) vervangen door de linkerterm van (2) en wordt het vermogen P van de rechterterm vervangen met behulp van (1) en hieruit volgt:

$$T^* = \frac{\theta_{a,in,nom} - \theta_{w,in,prim,nom} + P^* \left(\frac{P_{nom}}{C_{w,sec}} - \frac{P_{nom}}{\epsilon \cdot C_{min}} \right)}{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,prim,nom}} \quad (10)$$

In de teller, kunnen beide uitdrukkingen tussen de haakjes geschreven worden als het temperatuurverschil in de ontwerpconditie. De linkerterm tussen haakjes is gebaseerd op het waterzijdig temperatuurverschil (6) en de rechterterm is gebaseerd op de ε-NTU methode (7). Het resultaat is dan:

$$T^* = \frac{\theta_{a,in,nom} - \theta_{w,in,prim,nom} + P^* \left([\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,nom}] - [\theta_{a,in,nom} - \theta_{w,in,nom}] \right)}{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,prim,nom}} \quad (11)$$

$\theta_{w,in,nom}$ tussen haakjes in de teller vallen tegen elkaar weg. Dit resulteert in:

$$T^* = \frac{\theta_{a,in,nom} - \theta_{w,in,prim,nom} - P^* (\theta_{a,in,nom} - \theta_{w,uit,nom})}{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,prim,nom}} \quad (12)$$

Na het rangschikken wordt het waterzijdig temperatuurverschil T^* in deellast gevonden:

$$T^*(P^*) = \left[\frac{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{a,uit,nom}}{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,prim,nom}} \right] P^* + \frac{\theta_{a,in,nom} - \theta_{w,in,prim,nom}}{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,prim,nom}} \quad (13)$$

-Tabel 1-

$$d = (\theta_{(a,in,nom)} - \theta_{(w,in,prim,nom)}) / (\theta_{(w,uit,nom)} - \theta_{(w,in,prim,nom)}) \quad (16)$$

Deze vergelijking in goed te gebruiken in een spreadsheetprogramma. Het verloop van de waterretourtemperatuur in deellast wordt weergegeven door de richtingscoëfficiënt c . Omdat de temperaturen, benodigd voor het berekenen van c afkomstig zijn uit de ontwerpsituatie en daarmee constant zijn, is de richtingscoëfficiënt c ook constant. Hier doet zich een bijzonder situatie weer, namelijk dat de helling uitsluitend negatief kan worden. Het is immers niet mogelijk dat de waterretourtemperatuur $\theta_{w,uit,prim,nom}$ hoger wordt dan de luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in,nom}$ bij toepassing als koeler. Als gevolg, er is altijd sprake van een stijgend temperatuurverschil in deellast. Voor de limietsituatie geldt $c=0$ en is de waterretourtemperatuur $\theta_{w,uit,prim,nom}$ gelijk aan de luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in,nom}$ in de ontwerpconditie. Hierbij is het koelblok waterzijdig uitgelegd op bijvoorbeeld 10-28°C bij een luchtintredetemperatuur van 28°C. In deze bijzondere situatie geldt dat er sprake is van een constant temperatuurverschil in deellast en dat de waterretourtemperatuur 28°C en constant is. Dit is in ons vakgebied een

oneindige of zeer grote warmtewisselaar. Dit altijd stijgende temperatuurverschil in deellast ($c < 0$) is hét essentieel verschil tussen de voor- en de nakoeler. De voorkoeler kan een dalend, een gelijke of een stijgend temperatuurverschil in deellast bezitten [1]. Dit betekent ook dat er duidelijke verschillen tussen beide warmteafgiftekaracteristieken aanwezig zijn.

■ WARMTEAFGIFTE-KARAKTERISTIEK NAKOELER

In (14) is de vergelijking van het waterzijdig temperatuurverschil in deellast weergegeven. Hieruit kan de warmteafgiftekaracteristiek berekend worden voor een nakoeler: $P^*(q^{**}_m) = (q^{**}_m \cdot d) / (1 - q^{**}_m \cdot c)$ (17) Merk op dat hier q^{**}_m gebruikt wordt voor het waterzijdig debiet van de nakoeler. De noemer bepaalt de vorm van de warmteafgiftekaracteristiek. Met de waarde c (praktisch gezien) altijd < 0 en dus een stijgend temperatuurverloop in deellast, resulteert dit altijd in een bovenlineair verloop van de warmteafgiftekaracteristiek zoals is weergegeven in figuur 2. Met een hogere waarde van de richtingscoëfficiënt c stijgt T^* minder snel terwijl het bovenlineaire karakter afneemt, zoals te zien in figuur 3. De waarde van c is gestegen van -2,67

(figuur 2) naar -0,57 (figuur 3). Het is duidelijk dat de mate van stijging van het waterzijdig temperatuurverschil ook de kromming van de warmteafgifte karakteristiek bepaald. Kijken we naar de limietsituatie, waarbij de waterretourtemperatuur gelijk is aan de luchtintredetemperatuur, dan wordt het verloop gevonden zoals is aangegeven in figuur 4.

Het is duidelijk dat het verloop van het waterzijdig temperatuurverschil ook de vorm van de warmteafgifte karakteristiek bepaald. Voor de warmteafgifte karakteristiek van een naverwarmer/koeler zijn er 2 vormen mogelijk ($c < 0$; $c = 0$), voor de voorverwarmer/koeler zijn er 3 vormen mogelijk ($a < 0$; $a = 0$; $a > 0$ [1]), zie figuur 5. Wat verder opvalt aan figuur 2 t/m figuur 4 en figuur 5, is dat het allemaal vrij vlakke grafieken zijn.

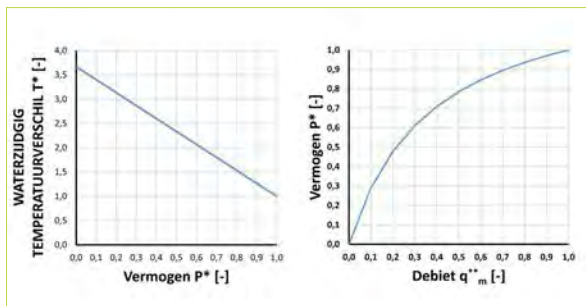
Dit wijkt af van een gangbare vuistregel dat bij (ongeveer) 20% van het debiet (ongeveer) 80% van het vermogen wordt afgegeven. Een sluitende verklaring kan niet worden gegeven, maar in gedachte moet worden gehouden dat veel vuistregels al jaren meegaan en vaak afkomstig zijn uit de tijdperiode dat 90-70°C gangbare ontwerptemperaturen waren. Ter indicatie, in figuur 6 de warmteafgifte karakteristiek van een luchtverwarmer, uitgelegd op 90°C/70°C/20°C.

Bij deze temperaturen past de genoemde vuistregel beter. Wel betekent dit dat deze vuistregel met de nodige voorzichtigheid gebruikt moet worden bij het ontwerpen en analyseren van installaties, specifiek bij de toepassing van laag temperatuur verwarming en hoog temperatuur koeling.

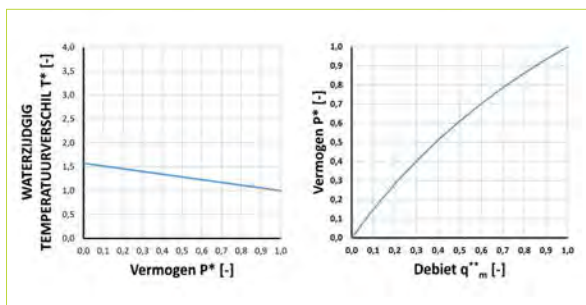
GECOMBINEERDE WARMTEAFGIFTEKARAKTERISTIEK

Nu resulteren de rekenmethoden voor de warmteafgifte karakteristieken van een voorcoeler en een nakoeler in een bijzonder punt. Voor een gelijke ontwerpsituaties ($P^* = 1$) maakt het, voor identieke warmtewisselaars, niet uit welke karakteristiek wordt gebruikt. In beide gevallen resulteert de gelijke luchtintredetemperatuur in dezelfde luchtuitredetemperatuur. Dit principe is weergegeven in figuur 7.

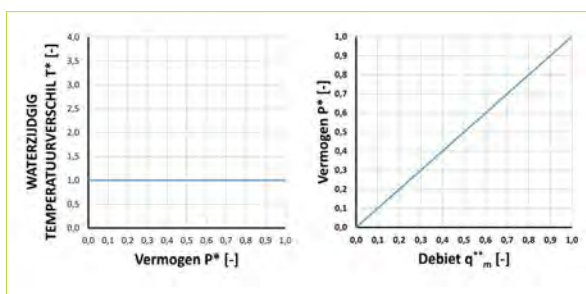
- voor de eerste situatie, de toepassing als voorcoeler (groene lijn), wordt door het primaire debiet q_m^* mee te laten stijgen met een geleidelijk stijgende luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in}$, de (ontwerp) uittredetemperatuur constant wordt gehouden ($\theta_{a,uit} = \theta_{a,uit,nom}$),
- voor de tweede situatie, de toepassing als nakoeler (blauwe lijn), geldt dat door het debiet q_m^{**} te verhogen de constante luchtuitredetemperatuur ($\theta_{a,in} = \theta_{a,in,nom}$) wordt verlaagd totdat de ontwerp uittredetempe-



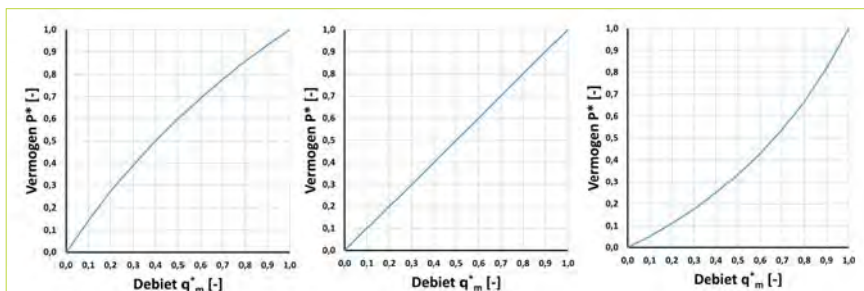
-Figuur 2- Waterzijdig temperatuurverloop in deellast (links) en bijbehorende warmteafgifte karakteristiek (rechts), $c < 0$, ($\theta_{a,in,nom} = 28^\circ\text{C}$; $\theta_{a,uit,nom} = 15^\circ\text{C}$, $\theta_{w,in,prim,nom} = 6^\circ\text{C}$, $\theta_{w,uit,prim,nom} = 12^\circ\text{C}$; $c = -2,67$)



-Figuur 3- Waterzijdig temperatuurverloop in deellast (links) en bijbehorende warmteafgifte karakteristiek (rechts), $c < 0$, ($\theta_{a,in,nom} = 28^\circ\text{C}$; $\theta_{a,uit,nom} = 15^\circ\text{C}$, $\theta_{w,in,prim,nom} = 6^\circ\text{C}$, $\theta_{w,uit,prim,nom} = 20^\circ\text{C}$; $c = -0,57$)

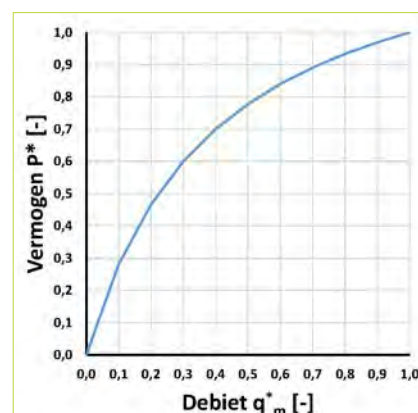


-Figuur 4- Waterzijdig temperatuurverloop in deellast (links) en bijbehorende warmteafgifte karakteristiek (rechts), $c = 0$, ($\theta_{a,in,nom} = 28^\circ\text{C}$; $\theta_{a,uit,nom} = 15^\circ\text{C}$, $\theta_{w,in,prim,nom} = 6^\circ\text{C}$, $\theta_{w,uit,prim,nom} = 28^\circ\text{C}$)



-Figuur 5- Warmteafgifte karakteristiek voor $a < 0$ (links, $a = -0,5$), $a = 0$ (midden) en $a > 0$ (rechts), ($a = 0,5$)

ratuur $\theta_{a,uit,nom}$ wordt gerealiseerd. Voor beide gevallen geldt nu, bij een volledig geopende klep ($q_m^* = 1$ & $q_m^{**} = 1$), dat de luchtintredetemperatuur, de luchtuitredetemperatuur en het waterzijdig debiet gelijk zijn. Het vermogen $P^* = 1$; het ontwerpvermogen. Beide karakteristieken komen, elk via een ander traject, op één en hetzelfde punt uit. - aanvullend is er sprake van een derde situatie, met een breder toepassingsgebied, die in feite een variant is van de nakoeler (tweede situatie). Hierbij wordt een luchtintredetemperatuur constant gehouden. Deze luchtintredetemperatuur varieert van de ontwerp luchtuitredetemperatuur $\theta_{a,uit,nom}$ (de minimum waarde) tot de ontwerp luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in,nom}$ (de maximum waarde) behorend bij de voorcoeler. Deze waarden worden gebruikt om de bijbehorende warmteafgifte karakteristiek te berekenen. Per debiet q_m^* (met een



-Figuur 6- Warmteafgifte karakteristiek voor een voorverwarmer (90°C/70°C/20°C)

bijbehorende, constante luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in}$ wordt door het verhogen van het debiet q_m^{**} een hoger vermogen afgegeven. Omdat de intredetemperaturen van de lucht constant wordt gehouden, is er sprake van

een karakteristiek overeenkomstig met een nakoeler.

Dit is weergegeven in figuur 8 voor 4 verschillende debieten q_m^* (en daarmee feitelijk 4 luchtintredetemperaturen). De motivatie volgt verderop in het artikel. Door nu het debiet q_m^{**} te verhogen, wordt de lucht gekoeld. De koelvermogens stijgen totdat de luchtuitredetemperatuur de constante ontwerpwaarde $\theta_{a,uit,nom}$ heeft bereikt. Dit wordt weergegeven door het kruisen van de lijnen van q_m^* en de gestippelde lijn. Dit snijpunt behoort bij het vermogen P^* dat nodig is om de constante luchtuitredetemperatuur te realiseren. Deze gestippelde lijn is identiek aan figuur 5, de meest rechtse warmteafgifte karakteristiek ($a > 0,5$) van een voorkoeler. Waar de lijnen elkaar kruisen geldt $q_m^* = q_m^{**}$. Dit komt verderop nog terug.

Bij de derde situatie wordt de afleiding van de nakoeler gebruikt om voor elke (afgeleide) luchtintredetemperatuur (q_m^* , variërend van 0 tot en met 1) het debiet q_m^{**} te laten variëren van 0 (de gesloten klep) tot en met 1 (de volledig geopende klep). Vanuit de warmteafgifte karakteristiek is er een verband tussen debiet q_m^* en vermogen en daarmee de luchtintredetemperatuur (bij een constante luchtuitredetemperatuur). Vandaar dat dit de afgeleide luchttemperatuur wordt genoemd. Dit wordt toegelicht in tabel 5 waarbij de gebruikte formules worden gegeven. De warmteafgifte karakteristiek van de voorkoeler wordt veelal gebruikt bij de selectie van het regelventiel. Aanvullend kan de kennis over de warmteafgifte karakteristiek van de nakoeler gebruikt worden bij monitoring, bewaking en/of nadere analyses van systemen of delen ervan:

- bij monitoring, omdat je met de juiste data een presentatieformat ter beschikking hebt;
 - bij bewaking, omdat afwijkend gedrag gedetecteerd kan worden;
 - bij verdere analyses, omdat causaliteit vastgesteld of juist uitgesloten kan worden tussen een (mogelijke) oorzaak en gevolg.
- De volgende paragrafen gaan hier verder op in.

■ GECOMBINEERDE WARMTE-AFGIFTEKARAKTERISTIEK VOOR $a < 0$

Door nu per q_m^* de warmteafgifte karakteristiek te construeren, en de resultaten met elkaar te verbinden, ontstaat figuur 9. Er is gekozen om beide assen uit drukken in de massastromen q_m^* en q_m^{**} . Dit werd ook gebruikt bij figuur 8 en is gekozen met de volgende motivatie. Enerzijds wordt er in alle eerdere grafieken van de warmteafgifte karakteristieken gebruikt gemaakt van de massastromen, waardoor de voorkoeler en de

nakoeler herkenbaar terug komen. Hierdoor is de verbinding tussen de eerdere figuren en figuur 9 nadrukkelijk aanwezig en beter te begrijpen. Anderzijds verdeelt dit de grafiek in 2 gelijke delen wat de beoordeling van gegevens eenvoudiger maakt. Hier wordt later in dit artikel op teruggekomen.

In deze grafiek zijn de (scheids)lijnen van constant vermogen af te lezen. Op bijvoorbeeld de scheidslijn tussen geel en grijs is het vermogen $P^* = 0,4$. Deze figuur geeft inzicht, maar is minder goed af te lezen. Daarom wordt van de 3D figuur 9 het bovenaanzicht gegeven in figuur 10 door middel van een zogenaamde contourplot.

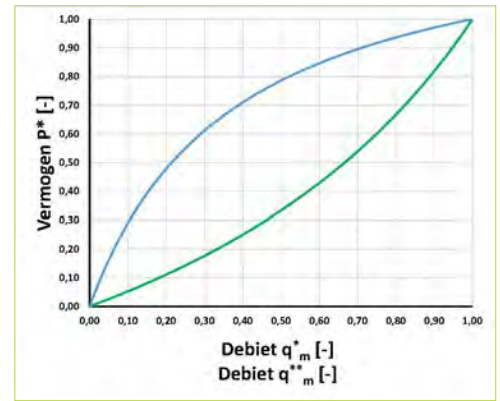
De contourlijnen geven de lijnen van constant vermogen weer als een soort hoogteprofiel weer. Waar de lijnen dicht bij elkaar liggen, is de gradient of stijging groot. Waar de lijnen ver(der) uit elkaar liggen, is de stijging minder of gering. In beide figuren zijn op de horizontale en verticale as 2 debieten uitgezet. Op de x-as q_m^* [-], deze as geeft ook een (indirecte) maat van de luchtintredetemperatuur. Dit debiet komt overeen met het debiet van de voorkoeler. Let op, de schaalverdeling voor de luchtintredetemperatuur is meestal niet lineair. Bij een bovenlineaire warmteafgifte karakteristiek ($a < 0$) zal in het begin de intredetemperatuur sneller stijgen en vervolgens richting het einde minder snel stijgen. Het niet-lineaire karakter van de warmteafgifte karakteristiek van de voorkoeler komt nu terug in de niet-lineaire verdeling van de luchtintredetemperatuur. Als voorbeeld is dit weergegeven voor 3 waarden van a ($a < 0$, $a = 0$ en $a > 0$) in Tabel 2. Voor het gebruik van de luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in}$ op de x-as in plaats van q_m^* , wordt verwezen naar de formules in tabel 6.

Dit verband tussen q_m^* en $\theta_{a,in}$ is alleen lineair indien in de ontwerp situatie de luchtuitredetemperatuur gelijk is aan de waterretourtemperatuur: $a = 0$. Zo is in tabel 2 voor $a = 0$ elke stap 1,6K (bijvoorbeeld $13,60 - 12 = 28 - 26,40 = 1,6K$).

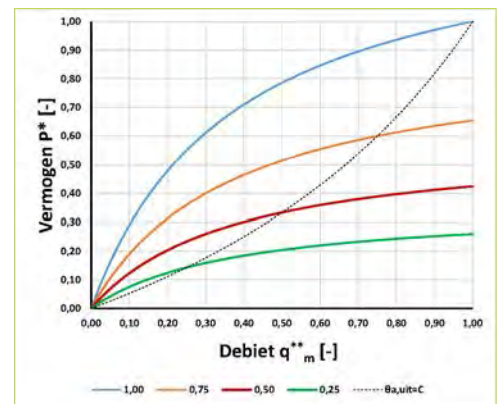
Op de y-as q_m^{**} [-] is het debiet weergegeven dat behoort bij de nakoeler en wordt weergegeven door de rode lijn. De warmteafgifte karakteristiek van de voorkoeler wordt voorgesteld door de blauwe lijn in figuur 10. Deze lijn verdeelt de figuur in 2 gelijke delen en voor deze lijn geldt:

$$q_m^{**}/q_m^* = 1 \quad (18)$$

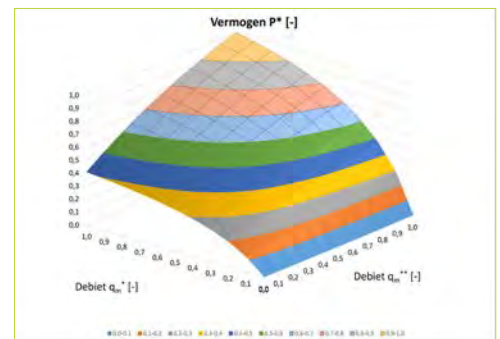
Op deze lijn is de luchtuitredetemperatuur constant (voorkoeler) en gelijk aan de ontwerpluchtuitredetemperatuur. Dit kwamen we ook tegen bij figuur 8 waar de lijnen de gestippelde lijnen elkaar kruisten. In voorbeeld 1 is het aflezen van de voorkoeler gegeven. In het eerste gebied, onder de blauwe lijn, wordt het vermogen P^* kleiner en geldt: $q_m^*/$



-Figuur 7- Warmteafgifte karakteristiek van een voorkoeler (groene lijn, $a=0,5$) en een nakoeler (blauwe lijn, $c=-2,67$), beide eindigend in het punt $P^*=1$



-Figuur 8- Warmteafgifte karakteristiek van een nakoeler ($c=-2,67$) bij verschillende debieten q_m^* bij een stijgend debiet q_m^{**}



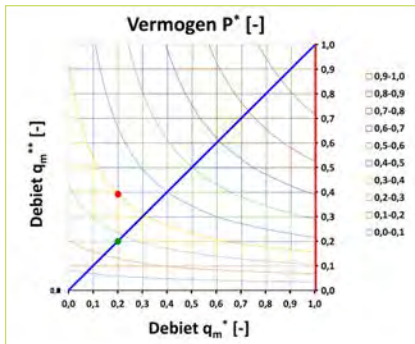
-Figuur 9- Gecombineerde warmteafgifte karakteristiek met een voorkoeler ($a=-0,5$) en nakoeler ($c=-2,67$) voor het volledige inzetbereik van de warmtewisselaar ($\theta_{a,in,nom} = 28^\circ C$; $\theta_{a,uit,nom} = 15^\circ C$, $\theta_{w,in,prim,nom} = 6^\circ C$, $\theta_{w,uit,prim,nom} = 12^\circ C$)

$q_m^{**} < 1$. Dit betekent dat de (gewenste) constante luchtuitredeconditie niet wordt gerealiseerd en het debiet lager is. In het tweede gebied, boven de blauwe lijn, is het vermogen groter en wordt een lagere uittredetemperatuur gerealiseerd en is $q_m^*/q_m^{**} > 1$. Dit verhoogd afgegeven vermogen wordt gerealiseerd door het debiet te verhogen. Dit verhoogde debiet wordt dan weergegeven door q_m^{**} en resulteert in een verlaagde luchtuitredetemperatuur. Door bijvoorbeeld, het setpoint van de luchtuitredetemperatuur lager in te stellen dan de ontwerpwaarde, wordt er dus

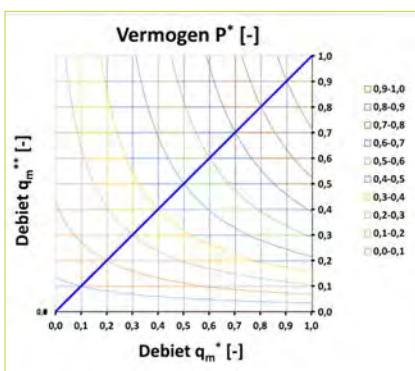
	Debiet q_m^*										
	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1
	(afgeleide) luchtintredetemperaatuur $\theta_{a,in}$										
$a=-0,5$	15	16,86	18,55	20,09	21,50	22,80	24,00	25,11	26,14	27,10	28
$a=0$	12	13,60	15,20	16,80	18,40	20,00	21,60	23,20	24,80	26,40	28
$a=0,50$	9	10,00	11,11	12,35	13,75	15,33	17,14	19,23	21,67	24,55	28

-Tabel 2- Omrekening van debiet q_m^* naar de luchtintredetemperaatuur $\theta_{a,in}$

-Tabel 3- $q_m^* = 0,2$



-Figuur 10- Gecombineerde warmteafgifte karakteristiek met een voorcoeler ($a=-0,5$) en een nakoeler ($c=-2,67$) voor het volledige inzetbereik van de warmtewisselaar ($\theta_{a,in,nom} = 28^\circ\text{C}$; $\theta_{a,uit,nom} = 15^\circ\text{C}$, $\theta_{w,in,prim,nom} = 6^\circ\text{C}$, $\theta_{w,uit,prim,nom} = 12^\circ\text{C}$)



-Figuur 11- Combineerde warmteafgifte karakteristiek met een voorcoeler ($a=0$) en een nakoeler ($c=-2,67$) voor het volledige inzetbereik van de warmtewisselaar ($\theta_{a,in,nom} = 28^\circ\text{C}$; $\theta_{a,uit,nom} = 12^\circ\text{C}$, $\theta_{w,in,prim,nom} = 6^\circ\text{C}$, $\theta_{w,uit,prim,nom} = 12^\circ\text{C}$)

meer debiet wordt verplaatst. Dit is een van de bekende oorzaken van het Low dT syndroom [5]. Merk op dat dit ook optreedt bij correct ingeregelde installaties, waarbij het debiet niet hoger kan worden dan het ontwerpdebiet. Dit geldt dus ook voor zogenaamde drukgecompenseerde regelventielen waarbij het debiet wordt begrensd op het ontwerpdebiet. Het gebied boven de blauwe lijn resulteert dus in een overdebiet als gevolg van het verlagen van het setpoint. Er kunnen ook andere oorzaken aanwezig zijn. Een ander aspect dat uit deze grafiek komt, volgt uit de lijnen van constant vermogen. De lijnen van constant vermogen hebben van rechts naar links gezien, een steeds

■ VOORBEELD I, bij fig 10

Voor $q_m^* = 0,2$ (x-as) is af te lezen $P^* = 0,27$ (op blauwe lijn, $q_m^*/q_m^{**} = 1$). Dit punt is weergegeven met een groene stip. Verder is op de blauwe lijn af te lezen dat voor $q_m^* = 0,5$ geeft $P^* = 0,6$, $q_m^* = 0,6$ resulteert in $P^* = 0,69$. Deze punten zijn niet weergegeven.

■ VOORBEELD II

Voor $q_m^* = 0,2$ is in figuur 10 af te lezen $P^* = 0,27$ ($q_m^*/q_m^{**} = 1$, groene stip). Nu is links af te lezen voor bij $q_m^* = 0,2$ en $q_m^{**} = 0,4$, $P^* = 0,40$ ($q_m^*/q_m^{**} = 0,4/0,2 = 2$). Dit is weergegeven met de rode stip. Indien het setpoint niet is gewijzigd, betekent dit dat er een andere oorzaak gezocht moet worden. Dit overdebiet is lastig te detecteren zonder referentiekader want "er zijn geen klachten". Overdebiet kan resulteren in bijvoorbeeld een verhoogd brondebiet en een verlaagde injectietemperatuur.

sterker oplopend karakter. Dit betekent dat het debiet steeds sterker verhoogd moet worden om meer vermogen te leveren: $q_m^*/q_m^{**} > 1$. Dit verhogen van het debiet heeft op een gegeven moment geen (praktisch) toegevoegde waarde meer, zie voorbeeld II. Dit is verder aangevuld in tabel 3 voor $q_m^* = 0,2$. Duidelijk is te zien dat een verdubbeling van het debiet niet resulteert in een verdubbeling van het vermogen. Om het vermogen voor $q_m^* = 0,2$ te verdubbelen, dient het debiet q_m^{**} in dit voorbeeld meer dan verviervoudigd te worden ($q_m^*/q_m^{**} = 4$).

■ GECOMBINEERDE WARMTE-AFGIFTEKARAKTERISTIEK VOOR $a=0$

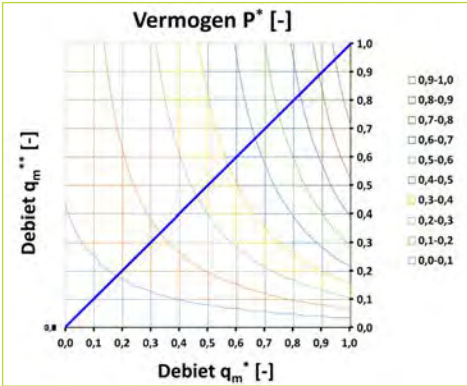
Voor de warmtewisselaar met een constant temperatuurverschil in deellast ($a=0$), wordt een iets afwijkende figuur verkregen, zie figuur 11. Weer is op de x-as $q_m^* [-]$ het debiet weergegeven waarbij voor deze situatie de schaalverdeling voor de luchtintredetemperaatuur wel lineair is (zie tabel 2, $a=0$). In deze situatie geldt dat op de blauwe lijn voor bijvoorbeeld $q_m^* = 0,2$, $P^* = 0,2$ en voor $q_m^* = 0,7$, $P^* = 0,7$. Dit is de lineaire warmteafgifte karakteristiek

q_m^{**}	q_m^*/q_m^{**}	P^*	P^*
[-]	[-]	[-]	[%]
0,2	1	0,27	100
0,4	2	0,40	148
0,6	3	0,48	177
0,8	4	0,53	196
1	5	0,57	209

van een voorcoeler.

■ GECOMBINEERDE WARMTE-AFGIFTEKARAKTERISTIEK VOOR $a>0$

Voor de warmtewisselaar met een dalend temperatuurverschil in deellast ($a>0$), wordt de gecombineerde warmteafgifte karakteristiek in figuur 12 weergegeven. Wederom is de schaalverdeling voor de luchtintredetemperaatuur niet lineair (zie tabel 2, $a>0$). Worden de grafieken naast elkaar afgebeeld, dan worden de verschillen duidelijker. Dit is gedaan in Tabel 4. Zo is duidelijk te zien dat voor de situatie $a>0$ de lijnen sneller meer verticaal lopen dan voor $a<0$. Dit betekent dat dit type warmtewisselaar gevoeliger zijn voor verstoringen. Warmtewisselaars (met $a>0$) worden veelal geselecteerd bij de toepassing van bodemenergiesystemen en/of ontvochtiging. Dit betekent dat lichte verstoringen van het setpoint, maar ook foutief geplaatste temperatuuroptnemers en vereenvoudigde selectieaanvragen bij leveranciers (waar zit de opwarming van de ventilator in het ontwerp?) een grotere invloed hebben op het werkelijk benodigd debiet. In deze gevallen is $q_m^*/q_m^{**} > 1$ en is er grotere kans op een overdebiet dan bij traditionele koelinstallaties ($a<0$, bijvoorbeeld $6^\circ\text{C}/12^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$). Overdebieten resulteren in een lagere retourwatertemperatuur en dus een verlaging van het temperatuurverschil [5]. Ook stijgt daarmee het debiet en daarmee het pompvermogen. Bij energiesystemen die baat hebben bij een groot temperatuurverschil, is dit een bedreiging van het rendement. Er worden 2 voorbeelden gegeven uit de praktijk. Het eerste voorbeeld is niet beschikbaar zijn van het maximaal vermogen van de warmtepomp (intredetemperaatuur verdampen te laag) met als gevolg meer inzet van niet-duurzame energiebronnen. Het tweede is



-Figuur 12- Gecombineerde warmteafgifte karakteristiek met een voorcoeler ($a > 0,5$) en een nakoeler ($c = -2,67$) voor het volledige inzetbereik van de warmtewisselaar ($\theta_{a,in,nom} = 28^\circ\text{C}$; $\theta_{a,uit,nom} = 9^\circ\text{C}$; $\theta_{w,in,prim,nom} = 6^\circ\text{C}$; $\theta_{w,uit,prim,nom} = 12^\circ\text{C}$)

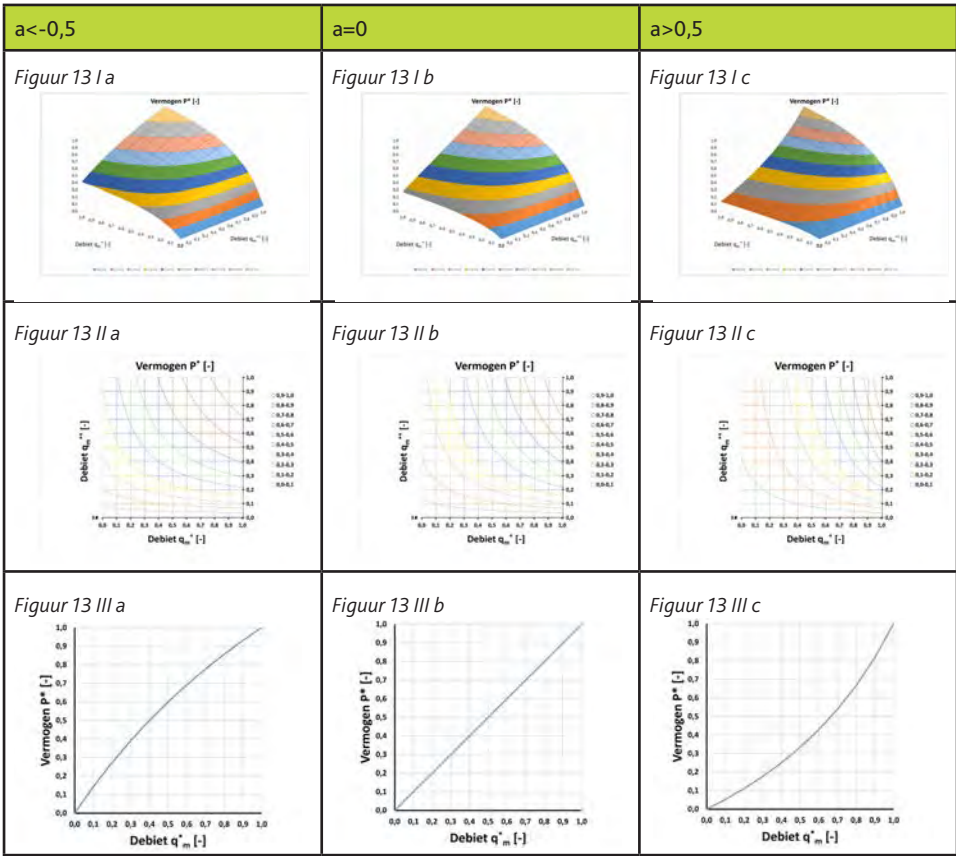
het verlagen van het setpoint van de uittre-detemperatuur van de warmtepomp met als gevolg een daling van de C.O.P, een daling van het beschikbare verwarmingsvermogen en een daling van de laadcapaciteit van de bronnen. Omgekeerd, door een hogere inblaas-temperatuur te accepteren of in te stellen, kan het debiet worden verlaagd. Opgemerkt wordt dat deze figuren gelden voor de randvoor-waarden zoals genoemd in dit artikel en [1]. Herkenbare waarden zijn $10^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}/16^\circ\text{C}$ ($a = 0,25$) voor bijvoorbeeld bodemwarmtesys-temen maar ook bij koelsystemen waarbij de lucht sterk wordt ontvochtigd, bijvoorbeeld $6^\circ\text{C}/12^\circ\text{C}/9^\circ\text{C}$ ($a = 0,5$). Beide zijn benaderin-gen omdat hier niet droog wordt gekoeld.

CONCLUSIE

In dit artikel is een afleiding gepresenteerd voor het waterzijdig temperatuurverloop in deellast en gekoppeld aan de warmteafgif-tekarakteristiek van een nakoeler en is een uitbreiding op de afleiding van een voorcoeler [1]. Deze afleiding is uitgebreid voor het gehele inzetbereik waarbij zowel de warmteafgif-tekarakteristiek van de nakoeler als van de voorcoeler in 1 grafiek zijn gecombineerd. Er is toegelicht dat de toepassing van een warmtewisselaar bij onder andere duurzame toepassingen (veelal $a > 0$) het risico van overdebiet groter is dan bij meer traditionele toepassingen (met $a < 0$). Om overdebieten en de kwalijke gevolgen ervan te beperken, dient er voldoende aandacht gegeven te worden in het ontwerp- als wel in de beheersfase.

VERVOLG

Op basis van de warmteafgifte karakteristiek van de voorcoeler, wordt vaak de klepkarakte-ristiek bepaald en de meest 'ideale' klepauto-riteit geselecteerd. Deze 'ideale' klepautoriteit wordt gedefinieerd. Aangetoond wordt dat dat



-Tabel 4- Vergelijk gecombineerde warmteafgifte karakteristieken en (I & II) warmteafgifte karakteristiek van een voorcoeler (III)

Voor elke waarde van $0 < q_m^* \leq 1$ geldt het volgende vermogen voor een voorcoeler	[1]
$P^*(q_m^*) = \frac{q_m^* \cdot b}{(1 - q_m^* \cdot a)}$	(19)
Uit dit vermogen P^* , kan per P^* de bijbehorende luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in}$ worden berekend:	
$\theta_{a,in}(P^*) = T_{a,uit} + P^*(T_{a,in,nom} - T_{a,uit,nom})$	(20)
De waarde van c wordt berekend met (15) en blijft constant. De waarde van d (16) is niet constant omdat $\theta_{a,in,nom}$ wordt vervangen door $\theta_{a,in}$ en afhankelijk is van het debiet q_m^* . Een waarde d' wordt als volgt berekend:	
$d' = \frac{(\theta_{a,in} - \theta_{w,in,prim,nom})}{(\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,prim,nom})}$	(21)
Het afgegeven vermogen wordt nu berekend en vanuit vergelijking (19) en is geldig voor $0 < q_m^* \leq 1$ en $0 < q_m^* \leq 1$.	
$P^*(q_m^*, q_m^{**}) = \frac{q_m^{**} \cdot d'}{(1 - q_m^* \cdot c)}$	(22)

-Tabel 5- Bepaling afgeleide luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in}$

Voor de leesbaarheid en/of dagelijkse praktijk kan het eenvoudiger zijn om q_m^* op de x-as te vervangen door $\theta_{a,in}$. De vergelijking luidt voor deze situatie: $P^*(\theta_{a,in,q_m^{**}}) = (q_m^{**} \cdot d') / (1 - q_m^{**} \cdot c)$	(23)
Nu wordt op de x-as vanuit $\theta_{a,in}$ lineair weergegeven, uit deze waarde direct d' berekend (21) en van hieruit het vermogen (23). Let op dat de lijn $q_m^* / q_m^{**} = 1$ nu geen rechte meer is.	

-Tabel 6- Bepaling gecombineerde warmteafgifte karakteristiek met $\theta_{a,in,linear}$ op de x-as

een combinatie van een equiprocentuele klep en een klepautoriteit van 1 niet automatisch resulteert in de 'ideale' situatie.

LITERATUUR

1. Brink, A.H.T.M. van den, Rekenen met warmtewisselaars, TVVL Magazine 02-2017
2. Brink, A.H.T.M. van den, Boxem, G., Schijndel, A.W.M. van, Deellast gedrag van een koelbatterij in een Nederlands klimaat, TVVL Magazine 06-2013

3. ISO-publikatie 44, Ontwerp van hydraulische schakelingen voor verwarmen, ISBN 90-5044-064-9, 1998
4. ISO-publikatie 47, Ontwerp van hydraulische schakelingen voor koelen, ISBN 90-5044-112-2, 2005
5. Brink, A.H.T.M. van den, Boxem, G., Schijndel, J., Een aantal oorzaken en gevolgen van een verlaagd waterzijdig temperatuurverschil, TVVL Magazine 01-2014