

# Ontwikkeling van een hardware-rack ten behoeve van een duurzaam, modulair datacenter.

## **Better.be B.V. in Enschede en Universiteit Twente**

Afdeling Infra Services en Opleiding Industrieel Ontwerp

## BACHELOR OPDRACHT

Door:

- Vincent Slotman, s0092061, [v.slotman@student.utwente.nl](mailto:v.slotman@student.utwente.nl)

Begeleiders:

- Ir. Reinder Cuperus - Systems Engineer (Better.be)
- Dr. Ir. Wessel Wits - Assistent Professor CTW (Universiteit Twente)
- Theo Balijon - Chief Technology Officer (Better.be)

Enschede mei – augustus 2014

## Samenvatting

Datacenters zijn een onmisbare component in onze samenleving. Het merendeel van de rekenkracht die beschikbaar is van computers wordt vanuit deze datacenters geleverd. De apparatuur in en rond deze datacenters gebruikt echter zeer veel energie. Het doel van deze opdracht is het ontwerp van een energiezuinig serverrack, dat efficiënter is qua stroomverbruik en koeling dan de huidige oplossingen.

Het serverrack wordt ontworpen voor gebruik bij Better.be en is toegespitst op koeling door middel van ventilatie met gefilterde, ongekoelde buitenlucht.

Om een efficiënte stroomvoorziening te ontwerpen zijn vijf verschillende topologieën vergeleken, waarna de meest efficiënte wordt toegepast binnen het ontwerp.

Voor de koeling is een model opgesteld waarmee het mogelijk is om te berekenen hoe goed een server gekoeld wordt afhankelijk van de stroomsnelheid van de lucht. Dit model zal gebruikt worden om verschillende behuizingen te evalueren. Dit model is geverifieerd en gecorrigeerd aan de hand van windtunnel-experimenten. Uiteindelijk wordt dit model gebruikt voor het bepalen van een efficiënte oplossing voor passieve koeling van het serverrack.

Ten slotte wordt binnen het eisenpakket dat aan het rack is gesteld een keuze gemaakt voor het precieze ontwerp, de materialen en constructiemethode. Van dit alles worden de kosten berekend.

Uiteindelijk is te verwachten dat door middel van dit nieuwe type serverrack een significante kostenbesparing te realiseren is.

## Summary

Data centers are a vital component in our society. Most of the computing power available from computers is supplied from these datacenters. However, the equipment in and around these centers use a lot of energy.

The purpose of this assignment is to design an energy-efficient server rack, which is more efficient in terms of power-use and cooling than current solutions.

The server rack will be designed for use in Better.be and is specifically designed for cooling through ventilation with filtered, uncooled air.

In order to design an efficient power supply, five different topologies are compared, after which the most efficient solution is to be applied in the final design of the server rack.

For cooling, a theoretical model was constructed which makes it possible to calculate how well a server is cooled depending on the flow rate of the air. This model will be used to evaluate different types of ducting and chassis. The theoretical model has been verified and corrected on the basis of wind tunnel experiments. Ultimately, this model is used for the determination of an efficient solution for passive cooling of the server rack.

Finally, based on the requirements to the server rack, a choice is made for the exact design, materials and construction method. The costs of all this is calculated.

It is expected that through this new type of server rack significant cost savings can be realized.

# Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	1
	Better.be.....	1
	Aanleiding.....	2
	Doelstelling.....	2
	Kader.....	3
	Aanpak.....	3
2	Studie 1: De de ontwikkeling van de stroomvoorziening van een rack.....	5
	Inleiding.....	5
	Huidige oplossing (230Vac).....	5
	Huidige oplossing in Bypass-modus (230Vac Bypass).....	7
	Alternatieve oplossingen.....	7
	Theoretische alternatieven.....	9
	Vergelijking van alternatieven.....	9
	Resultaten.....	9
	Conclusie.....	10
3	Studie 2: De ontwikkeling van de koeling van een rack.....	11
	Inleiding.....	11
	Benodigd debiet en temperatuurverschil.....	11
	Theoretisch model.....	12
	Experimentele Verificatie.....	20
	Revisie van het theoretisch model.....	26
	Conclusie.....	27
4	Ontwerp van het rack.....	28
	Ontwerpdoel.....	28
	Ontwerpvoorstellen.....	29
	Stroomvoorziening.....	29
	Koeling.....	29
	Keuze voor ducting.....	29
	Plaatsing van servers en overige componenten.....	30
	Filtering van ingaande lucht.....	30
	Autonome koeling.....	30
	Materiaalkeuze.....	30
	Vervoer.....	31
	Kostenberekening.....	32
	Conclusie.....	37
	Referentielijst.....	38
	Bijlagen.....	42
	Bijlage 1: Programma van Eisen.....	43
	Eisen.....	43
	Wensen.....	47
	Bijlage 2: Meetmethoden voor stroomverbruik en efficiëntie.....	48
	Meetapparatuur.....	48
	Bepaling van het verbruik en de efficiëntie van een server.....	48
	Bepaling van het ventilatordebiet en het drukverschil in het datacenter van Better.be.....	50
	Bijlage 3: Efficiëntie van componenten.....	52
	Bijlage 5 Koeling - Achtergrond en doelstellingen.....	53
	Inleiding.....	53

Grondbeginselen.....	53
Benodigd debiet en temperatuurverschil.....	55
Ventilatorvermogen en -efficiëntie.....	55
Doelstellingen chassis-ontwerp met betrekking tot de koeling.....	57
Bijlage 6: Experimentele verificatie van het theoretische model.....	58
Gedrag van de tunnel.....	60
Bijlage 7: Meetplan voor het experimenteel verifiëren van het theoretisch model.....	64
Doel.....	64
Onderzoeksvragen.....	64
Uitvoering.....	64
Gebruikte Meetapparatuur.....	65
Nauwkeurigheid en benodigd aantal meetpunten.....	66
Benodigde grootheden.....	67
Meetpunten.....	67
Positie van drukmeetpunten.....	68
Methode van dataverzameling.....	68
Meetplan.....	69
Bijlage 8: Correcties aan het theoretisch model.....	70
Correcties van meetresultaten.....	70

# 1 Inleiding

Datacenters zijn een onmisbare component in onze moderne samenleving. Het merendeel van de rekenkracht die beschikbaar is van computers wordt vanuit deze datacenters geleverd. Deze datacenters gebruiken echter zeer veel energie. Grote datacenters zoals die van Google verbruiken al snel dezelfde hoeveelheid energie als een hele stad in Nederland verbruikt (Glanz, 2012).

Het stroomverbruik van een datacenter ligt niet zozeer aan de energie die de in het datacenter gehuisveste servers (computers) nodig hebben om data te verwerken, maar een groot deel van het stroomverbruik wordt veroorzaakt door de koeling van de apparatuur in het datacenter.

Temperaturen in een server kunnen namelijk sterk oplopen bij hoge belasting van de chips, maar deze onderdelen gaan kapot bij een te hoge temperatuur. Servers moeten daarom goed gekoeld worden.

Zowel in het kader van kostenbesparing als om het milieu minder te belasten, is het interessant voor datacenter-houders om te investeren in innovatieve oplossingen en om onderzoek uit te voeren om het energieverbruik van een datacenter zo laag mogelijk te houden. Om energie te besparen zal de efficiëntie van de componenten binnen het datacenter verhoogd moeten worden. Toch wordt er veelal niet afgeweken van standaardoplossingen die beschikbaar zijn.

Een betere efficiëntie kan worden behaald op zowel het gebied van de stroomvoorziening als op de koeling. Dit kan worden bereikt door het ontwerp van servers en serverracks dusdanig aan te passen dat er optimaal gebruik wordt gemaakt van koeling en aangeleverde energie.

In deze opdracht wordt onderzoek gedaan naar de efficiëntie van een serverrack, wordt onderzocht welke verschillende alternatieven er zijn, en worden er testen uitgevoerd om te zien wat het meest efficiënt is. Het uiteindelijke doel is om de resultaten hiervan samen te laten komen in een ontwerpvoorstel van een nieuw type server-rack die efficiënt is op het gebied van zowel stroomverbruik als koeling. Dit rack zal mogelijk in de toekomst toegepast worden door Better.be.

## **Better.be**

Better.be BV (Better.be) is een innovatief ICT bedrijf in Enschede en richt zich vooral op de bedrijfstakken Automotive Leasing, Semicon en Broadcast Media. Better.be kan onder andere marktleiders als Directlease, ASML, ComScore en MTV tot zijn klantenkring rekenen.

Better.be ontwikkelt softwareproducten die de klanten ondersteunt binnen hun primaire bedrijfsprocessen, en deze bedrijven in staat stelt hun marktpositie te verstevigen. Deze software wordt gehost via de hardware en infrastructuur van Better.be, en is verdeeld over meerdere datacenters.

Better.be heeft de verwachting dat het de komende jaren sterk zal groeien, en is hiervoor concreet bezig met de ontwikkeling van een nieuw datacenter, zo energie-zuinig als mogelijk.

## ***Aanleiding***

Een groot deel van de kosten van een datacenter wordt bepaald door het energieverbruik, wat voornamelijk veroorzaakt wordt door de hoog-vermogen apparatuur en de koeling hiervan.

Better.be heeft een zeer efficiënte en kostenbesparende oplossing ontwikkeld voor het koelen van het serverpark, waarbij warmte afgevoerd wordt door middel van ventilatie met gefilterde buitenlucht, waarbij slechts in de zomer door middel van waterverdamping (adiabatisch) gekoeld hoeft te worden. Door deze koelmethode is per 100W door het datacenter opgenomen vermogen slechts 5W extra benodigd om te koelen, wat 16x minder is dan het wereldwijd gemiddelde (Uptime Institute, 2013).

Better.be is echter nog niet tevreden met deze besparing en wil dit nog een stap verder nemen. Doordat er weinig ruimte is om verder te besparen op de koeling van het datacenter, dient gekeken te worden naar het verbruik van de apparatuur zelf. De grootste winsten zullen te behalen zijn door functies die in het huidige systeem in elke server afzonderlijk worden uitgevoerd (zoals spanningsconversie en ventilatie), te verplaatsen naar rack-niveau. Bovendien moet dit nieuwe rackontwerp de schaalbaarheid van het datacenter verhogen en zo Better.be in staat stellen om zonder grote investeringen een datacenter geleidelijk uit te breiden.

## ***Doelstelling***

Het doel van deze opdracht is het ontwerp van een nieuwe generatie server-huisvesting die Better.be in staat stelt zijn nieuwe datacenter zo goedkoop, efficiënt en flexibel mogelijk in te richten. Dit ontwerp dient geoptimaliseerd te zijn voor het gebruik van Better.be's ventilatie-koeling en zo laag mogelijke verliezen in de stroomvoorziening. Door integratie van onderdelen in een modulair ontwerp dient een zo schaalbaar en flexibel mogelijk systeem ontwikkeld te worden, dat met minimale moeite geïnstalleerd kan worden in het te bouwen datacenter.

Het onderzoek naar de te ontwikkelen serverhuisvesting (rack) zal zich richten op het optimaliseren van de stroomvoorziening en koeling van de componenten in één rack en integratie hiervan in het datacenter en de bedrijfsvoering van Better.be.

Hierbij zal de stroomvoorziening, koeling en plaatsing van de individuele servers binnen het rack onderzocht worden, en er wordt uitgewerkt hoe dit toe te passen is binnen het te ontwerpen rack. Aan de hand van koel-eigenschappen van het ontworpen rack worden de eisen aan de koelingvoorziening van het datacenter opgesteld.

Op basis van de verwachte efficiëntie van het ontwikkelde rack wordt een schatting gemaakt van de kostenbesparing ten opzichte van de lopende- en investeringskosten van de huidige oplossing voor serverhuisvesting.

Het uiteindelijke rack-ontwerp zal gepresenteerd worden als CAD-model.

## ***Kader***

Dit onderzoek richt zich op het ontwerp van een nieuw type server-rack voor gebruik binnen Better.be. Dit rack zal voldoen aan de voorwaarden die door Better.be gesteld zijn.

Het resultaat van deze opdracht is een ontwerp op papier en in de vorm van CAD-modellen. Er zal geen fysieke representatie worden gebouwd binnen de tijdspanne van deze opdracht.

Voor deze opdracht zijn verschillende scenario's op het gebied van stroomvoorziening en koeling getest. Dit is gedaan aan de hand van modellen en formules uit de literatuur, deels ondersteund met metingen uitgevoerd bij Better.be en deels ondersteund met aannames.

Bij de aannames die gebruikt zijn in dit onderzoek wordt duidelijk vermeld waarom deze aannames zijn gemaakt en, indien van toepassing, waar de aannames vandaan komen. Aannames zijn nodig om een studie behapbaar en generaliseerbaar te houden, en om de resultaten in context te kunnen zetten en te kunnen vergelijken met de wetenschappelijke literatuur die op dit gebied beschikbaar is.

## ***Aanpak***

Deze opdracht bestaat uit verschillende fases in het ontwerp van een server-rack, beginnende bij theoretische modellen tot en met de ontwikkeling van een CAD model van het uiteindelijke ontwerp van een nieuw type server-rack.

Het eerste deel van het onderzoek bestaat uit een studie van de stroomvoorziening, gevolgd door een studie van de koeling. Vervolgens wordt de inkadering van het ontwerp kort besproken. Op basis van de eisen aan het ontwerp wordt een ontwerpvoorstel gedaan, met verschillende alternatieven. Ten slotte worden de kosten berekend van het ontwerp, en een schatting gedaan van de mogelijke besparingen.



## **Deel 1: Stroomvoorziening**

Dit onderzoek zal zich in eerste instantie richten op het ontwikkelen van een efficiënte en schaalbare oplossing voor de stroomvoorziening van de componenten in een rack. Hierbij zal onderzocht worden wat de beperkingen zijn aan de huidige manier van stroomvoorziening en hoe deze verminderd kunnen worden. Er zal een vergelijking worden gemaakt tussen de huidige situatie, twee alternatieve situaties die momenteel al toegepast worden binnen enkele datacenters, en twee theoretische situaties die zijn ontworpen binnen deze opdracht. Deze fase van het onderzoek zal leiden tot een theoretisch voorstel voor een verbeterde, meer efficiënte stroomvoorziening, toe te passen op het te ontwerpen server-rack.

## **Deel 2: Koeling**

In de volgende fase van dit onderzoek wordt gezocht naar een effectieve methode om servers binnen een rack passief (zonder lokale ventilatoren per server) te koelen. Hiervoor wordt een theoretisch model opgesteld dat kan voorspellen hoeveel lucht benodigd is om een server in een omhuizing voldoende te koelen, en welk drukverschil dit veroorzaakt in een willekeurige server voorzien van een bepaald type ducting (omhulling die de luchtstroom over de koelblokken leidt). Hiermee is te berekenen welk type ducting het meest efficiënt is. Om tot dit model te komen wordt er in eerste instantie een initieel model opgesteld op basis van de beschikbare literatuur. Dit model wordt vervolgens getest middels een experimentele setup. Op basis daarvan wordt het model aangepast, zodat het een goede voorspelling kan geven van de gemeten waarden in de testopstelling. Met het uiteindelijke model kan betrouwbaar worden berekend welk type ducting het meest efficiënt is om toe te passen binnen het te ontwerpen server-rack.

## **Deel 3: Ontwerpvoorstel**

Op basis van het onderzoek naar de stroomvoorziening en het onderzoek naar de koeling wordt een keuze gemaakt voor een verder te ontwikkelen rackontwerp. Vervolgens zal er een ontwerpvoorstel worden gedaan voor het server-rack. Voor dit voorstel zullen verschillende alternatieven gemaakt worden, en de voor- en nadelen van deze alternatieven zullen worden besproken. Het ontwerpvoorstel zal worden geëvalueerd aan de hand van de in het Programma van Eisen gestelde eisen.

## **Deel 4: Kosten en Besparingen**

Van het nieuw ontworpen server-rack zal een overzicht worden gegeven van alle kosten om het rack te bouwen en te vullen met apparatuur. Ten slotte wordt berekend wat de efficiëntie van dit ontwerp is met betrekking tot energiegebruik, en bepaald welke besparingen dit oplevert ten opzichte van de huidige situatie binnen Better.be.

## **2 Studie 1: De de ontwikkeling van de stroomvoorziening van een rack**

Dit deel van het onderzoek zal zich richten op de ontwikkeling van een efficiëntere stroomvoorziening voor het datacenter van Better.be en de daarin te plaatsen apparatuur. De efficiëntie en beperkingen van de huidige oplossing zullen beoordeeld worden, waarna een tweetal alternatieve oplossingen worden verkend. Van deze alternatieve oplossingen wordt de efficiëntie berekend op basis van de fabrieksspecificaties en het door Better.be verwachte gebruik.

Naast deze twee alternatieve oplossingen is een tweetal theoretische oplossingen voor de stroomvoorziening ontwikkeld. Ook van deze oplossingen zal de efficiëntie getoetst worden door middel van modellen bij het door Better.be verwachte gebruik.

Op basis van deze berekeningen zal een oplossing gekozen worden, die vervolgens verder uitgewerkt wordt voor toepassing binnen het rack.

### ***Inleiding***

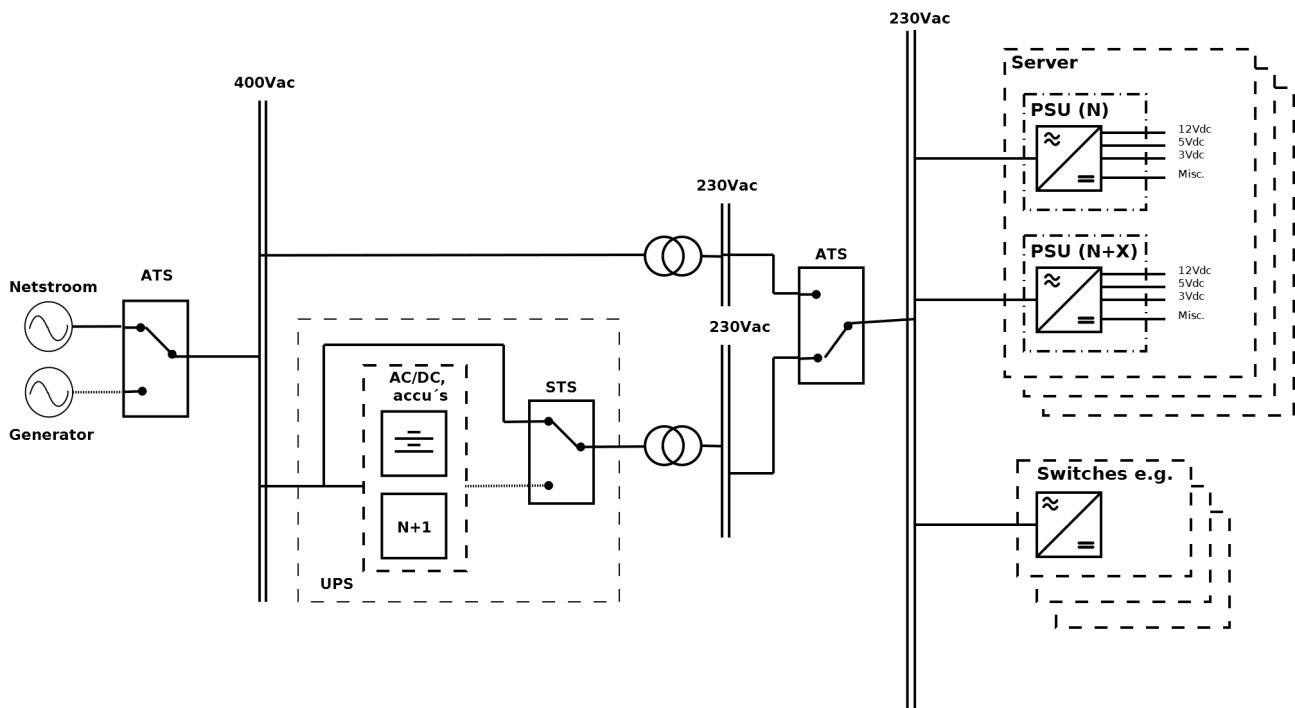
Een essentieel onderdeel in het datacenter is de stroomvoorziening van de apparatuur. Deze keten van stopcontact tot moederbord is essentieel voor het correct functioneren van de servers en ondersteunende apparatuur. Kleine onderbrekingen of onregelmatigheden kunnen namelijk al zorgen voor het uitvallen van functionaliteit.

Voordat netspanning geschikt is om door servers gebruikt te worden dient deze eerst omgezet te worden naar lagere voltages, een stap die efficiëntieverlies met zich mee brengt en momenteel in elke server afzonderlijk uitgevoerd wordt. Daarnaast is de noodstroomvoorziening (UPS of Uninterruptable Power Supply, een accu-gebaseerde stroombron) een belemmering voor de schaalbaarheid van een datacentrum. Doordat UPS-apparatuur vaak erg groot, zwaar en kostbaar is worden er slechts enkele per serverruimte geplaatst. De maximale capaciteit wordt zo begrenst door de UPS, terwijl uitbreiding een grote investering (de aanschaf van een extra UPS) vereist. Daarbij is een UPS bij deellast erg inefficiënt (The Green Grid, 2008).

### ***Huidige oplossing (230Vac)***

De huidige oplossing voor de stroomvoorziening van servers welke in gebruik is binnen het datacenter van Better.be, is de onderstaande 230Vac-oplossing (Afbeelding 2.1).

Hierbij loopt de primaire stroomkring vanaf het reguliere stroomnet (AC; wisselspanning), over een tweetal schakelaars, naar de racks. Deze racks worden gevoed met een of meerdere 230Vac-aansluitingen, waarbij elke server over een dubbele voeding (PSU) beschikt die zowel AC/DC conversie (van wisselspanning naar gelijkspanning) als DC/DC-spanningsconversie uitvoeren. Bij stroomuitval worden de racks door een ATS (Automatic Transfer Switch; automatische wisselschakelaar) aangesloten op de UPS, welke de stroom levert voor de apparatuur tot de generator bedrijfsklaar is.



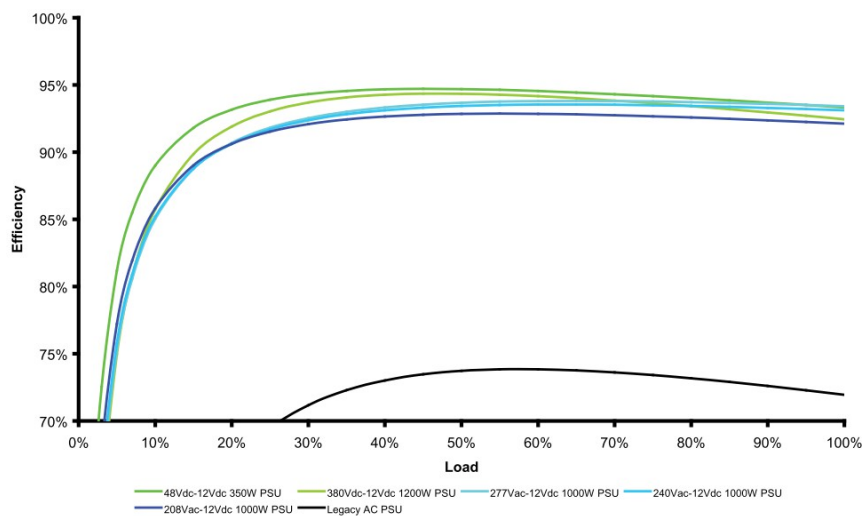
*Afbeelding 2.1: Better.be's huidige oplossing voor stroomvoorziening. In dit schema zijn de afzonderlijke bouwstenen van de stroomvoorziening. Ook zijn de verbindingen hiertussen, en het spanningsniveau van deze circuits weergegeven.*

## Onderdelen van deze oplossing

- ATS (Wisselschakelaar)**  
 Dit is een geautomatiseerde schakelaar die in staat is om te schakelen tussen twee spanningsbronnen. Zo kan, als de netspanning wegvalt, automatisch overgeschakeld worden op de generator.
- UPS (Uninterruptable Power Supply)**  
 De werking van de UPS van Better.be is weergegeven in Afbeelding 2.1. Bij normaal gebruik draait de apparatuur volledig op netspanning. Op het moment dat deze wegvalt wordt door de STS automatisch overgeschakeld op het backup-circuit, dat de apparatuur voedt via de lading in de accu's.
- STS (Statische Wisselschakelaar)**  
 Dit type wisselschakelaar is vergelijkbaar met een ATS, maar is opgebouwd uit halfgeleidercomponenten. Door deze samenstelling is een STS in staat zeer snel te schakelen tussen twee spanningsbronnen.
- PSU (Power Supply Unit of voeding)**  
 Dit onderdeel neemt zowel de AC/DC als DC/DC-conversie voor zijn rekening en converteert zo 230Vac in de verschillende gelijkspanningen voor het moederbord.

Meestal wordt in servers gebruik gemaakt van twee of meer voeding die allen op een ander stroomverdelingspunt (Power Distribution Unit of PDU) aangesloten zijn. Dit wordt gedaan om storingen in het verdeelpunt of uitval van een van de voedingen op te kunnen vangen.

Een van de nadelen van het toepassen van het meervoudig uitvoeren van voedingen is dat deze bij normaal gebruik minder dan 50% belast worden. Zoals blijkt uit Afbeelding 2.2 neemt de efficiëntie van een voeding sterk af bij lagere vermogens. Uit testen van Better.be is gebleken dat het toepassen van een dubbele voeding ten opzichte van het gebruik van een enkele voeding in de praktijk een efficiëntieverlies van 10% met zich meebrengt.



Afbeelding 2.2: Efficiëntie van verschillende types voedingen

### **Huidige oplossing in Bypass-modus (230Vac Bypass)**

De UPS van Better.be beschikt over de mogelijkheid om de stroom door middel van een STS om het accu-circuit heen te leiden. Dit levert een efficiëntere stroomvoorziening op, maar geeft een groter risico, omdat niet alle apparatuur bestand is tegen de kleine spanningsdip die het omschakelen van de STS veroorzaakt.

### **Alternatieve oplossingen**

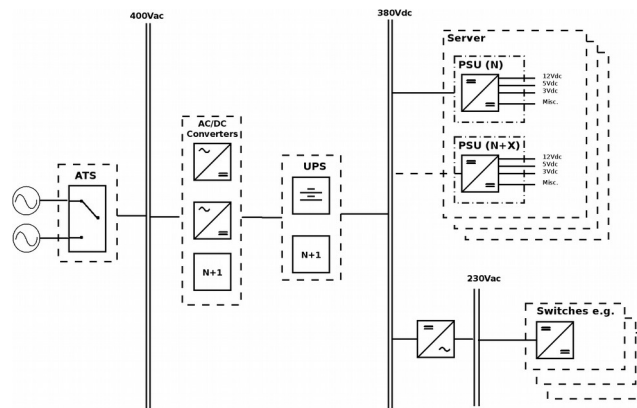
Om de beperkingen van de huidige keten van stroomvoorziening te verminderen wordt een tweetal alternatieve oplossingen onderzocht. Deze oplossingen worden reeds toegepast of zijn al ver in ontwikkeling.

### **High-voltage DC (400Vdc)**

De high-voltage-DC-oplossing is een relatief nieuwe ontwikkeling binnen datacenters en wordt in Europa en Amerika toegepast in ruim 24 datacenters in productie, en 11 testopstellingen (Geary, Electric, Starline, & Solutions, 2013). In Azië wordt een vergelijkbare techniek veel toegepast, met ruim 350 datacenters in productie en 11 testopstellingen. Hierbij wordt de AC/DC conversiestap

niet meer uitgevoerd op serverniveau, maar wordt op rij of vloer-niveau direct krachtstroom omgezet naar DC. De DC/DC-conversie, die relatief efficiënt is, wordt nog wel op serverniveau toegepast.

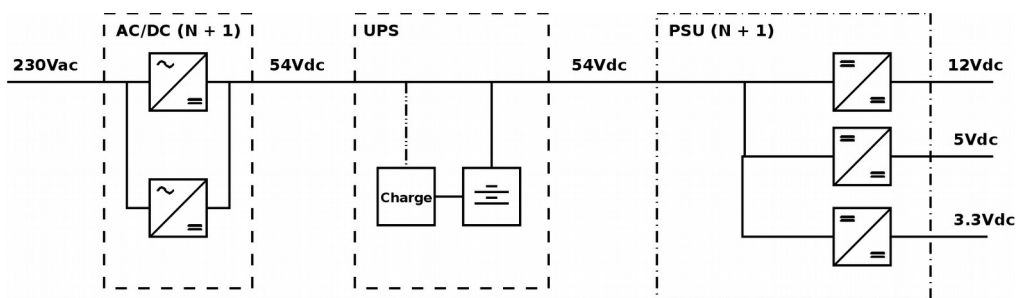
Een van de voordelen van het hoge voltage is het lage verlies in de bekabeling. Het nadeel is echter dat er nog niet veel hardware beschikbaar is voor deze topologie, hoewel bedrijven als Emerson, Delta, IBM en HP producten in ontwikkeling, of al op de markt hebben (Emerson Network Power & Szpek, 2013).



Afbeelding 2.3: High-voltage DC topologie

## Telecom (48Vdc)

Deze oplossing wordt veelvuldig toegepast binnen de telecom-industrie. De keuze voor 48Vdc is een gevolg van hoge continuïteitseisen en minimalisering van kabelverliezen. Doordat de accu's rechtstreeks aan de DC-lijn gekoppeld worden en de gebruikte PSUs een breed spanningsbereik hebben is een minder complexe UPS nodig.



Afbeelding 2.4: 48V Telecom topologie

## **Theoretische alternatieven**

Naast bovenstaande oplossingen voor stroomvoorziening zijn een tweetal zelf ontwikkelde alternatieven onderzocht. Aangezien deze oplossingen nog niet toegepast worden voor de stroomvoorziening van datacenter-apparatuur is aan de hand van literatuur en fabrieksspecificaties van afzonderlijke componenten een inschatting gemaakt van de te verwachten efficiëntie.

### **Vrachtwagen-accu's (24Vdc)**

Deze oplossing is, op de lagere werkspanning na, identiek aan de 48Vdc-oplossing. Het voordeel hiervan is dat er mogelijk goedkopere accu's gebruikt kunnen worden.

### **12V met LFP-accu's (12Vdc)**

Deze oplossing maakt gebruik van 12V lithium-ijzer-fosfaat (LiFePO<sub>4</sub> of LFP) accu's. Zoals uit de uitgebreide beschrijving in confidentiële Bijlage 4 blijkt, is de spanning die deze accu's leveren stabiel genoeg om rechtstreeks aan het moederbord geleverd te kunnen worden.

Bovendien maakt SuperMicro in een groot deel van zijn server-assortiment gebruik van zogenaamde Power-Distributors (PDs). Dit zijn zeer efficiënte DC/DC converters voor de omzetting van 12V naar de benodigde moederbord-spanningen.

## **Vergelijking van alternatieven**

Om een objectieve vergelijking van de alternatieven te kunnen maken is van elk onderdeel in de keten de efficiëntie bepaald, waarvan de resultaten zijn weergegeven in Tabel 2.1. De gebruikte onderdelen, de efficiëntie hiervan en de aannames die gedaan zijn om hiertoe te komen zijn vermeld in Bijlage 3. Per oplossing wordt de efficiëntie van de gehele keten afgeleid volgens de methoden van Rasmussen (Rasmussen, 2007). De totale efficiëntie van de keten van stroomvoorziening is het product van de afzonderlijke onderdelen, en wordt berekend volgens Vergelijking 2.1:

$$\begin{aligned} Eff_{totaal} &= Eff_{AC/DC} * Eff_{UPS} * Eff_{kabels} * Eff_{PSU} \\ Eff_{verlies} &= 100 - Eff_{totaal} \end{aligned}$$

(Vergelijking 2.1)

Hierbij is  $Eff_{totaal}$  de totale efficiëntie van de keten van stroomvoorziening,  $Eff_{AC/DC}$  de efficiëntie van de AC/DC-conversie,  $Eff_{UPS}$  de efficiëntie van de UPS,  $Eff_{kabels}$  de efficiëntie van de kabels en  $Eff_{PSU}$  de efficiëntie van de PSU.  $Eff_{verlies}$  is het totale verlies in de keten van stroomvoorziening.

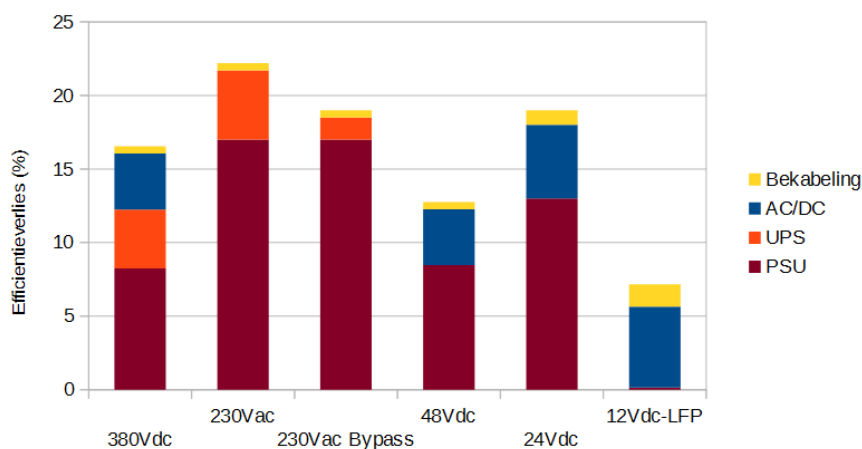
## **Resultaten**

Aan de hand van Vergelijking 2.1 en de efficiënties van de losse componenten is bepaald welke efficiëntie te behalen is met de verschillende alternatieven voor stroomvoorziening. De efficiëntie van de oplossingen is weergegeven in Tabel 2.1. Voor een beter overzicht is ook het efficiëntieverlies weergegeven.

Dit is de hoeveelheid stroom (%) die verloren gaat ten opzichte van een efficiëntie van 100%.

	400Vdc	230Vac	230Vac Bypass	48Vdc	24Vdc	12Vdc LFP
AC/DC	96,2%	100%	100%	96,2%	93,5%	94,5%
UPS	96%	95,3%	98,5%	100%	100%	100%
PSU	91,8%	83%	83%	91,5%	87%	100%
Bekabeling	99,5%	99,5%	99,5%	99%	98,5%	98%
Totaal	84,3%	78,7%	81,3%	87,6%	81,8%	92,9%

Tabel 2.1: Efficiëntie van verschillende oplossingen en alternatieven voor datacenter-stroomvoorziening. De componenten die hiervoor gebruikt zijn en de manier waarop de efficiëntie van de onderdelen bepaald is staat vermeld in Bijlage 3.



Afbeelding 2.5: Efficiëntieverlies van verschillende oplossingen en alternatieven voor datacenter-stroomvoorziening

Uit bovenstaande gegevens blijkt dat de 12Vdc-LFP-oplossing de hoogste efficiëntie biedt.

## Conclusie

Uit Afbeelding 2.5 blijkt dat de 12Vdc-LFP-oplossing de hoogste efficiëntie biedt. Dit komt voornamelijk doordat er middels deze oplossing ten opzichte van huidige situatie enkele stappen in de keten overbodig worden:

- AC/DC en DC/AC-conversie in de UPS
- AC/DC-conversie in de PSU
- 12V DC/DC-conversie in de PSU

Ten opzichte van andere DC/DC-oplossingen wordt de meeste winst behaald door het overbodig worden van de DC/DC-conversie in de PSU. Om deze redenen is besloten om de 12V-LFP oplossing toe te passen binnen het rack. De ontwikkeling van de stroomvoorziening is in detail beschreven in confidentiële Bijlage 4

### 3 Studie 2: De ontwikkeling van de koeling van een rack

#### **Inleiding**

In dit deel van het onderzoek zal de ontwikkeling van een model centraal staan waarmee het mogelijk is om te berekenen hoe goed een server gekoeld wordt afhankelijk van de stroomsnelheid van de lucht. Dit model zal gebruikt worden om verschillende afmetingen ducting (omhulling van de koelblokken) te evalueren. Hiermee is te bepalen welk type ducting en chassis (behuizing) het meest efficiënt is. Dit model zal getest worden door middel van een experiment, waarna gedane aannames gecorrigeerd zullen worden. Het model wordt vervolgens aan de hand van deze correcties aangepast.

De grondbeginselen van server- en datacenter-koeling, en hoe deze van toepassing zijn op het ontwikkelde model, worden toegelicht in Bijlage 5.

#### **Benodigd debiet en temperatuurverschil**

Een van de meest gebruikte parameters voor het karakteriseren van de koeling van een datacenter is het debiet ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), de hoeveelheid lucht (in  $\text{m}^3$ ) die per uur benodigd is om de apparatuur voldoende te koelen. Meestal wordt hier gebruik gemaakt van  $\text{m}^3/\text{kW}/\text{h}$ .

Een andere parameter voor het karakteriseren van de koeling van een datacenter is het temperatuurverschil tussen de ingaande en uitgaande lucht ( $\Delta T$ ). Dit temperatuurverschil is afhankelijk van het debiet  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) en de af te voeren warmte  $H$  (W) volgens:

$$Q = \frac{H}{\rho c_p \Delta T} \quad (\text{Vergelijking 3.1})$$

Hierbij is  $\rho$  het soortelijk gewicht van lucht, en  $c_p$  de specifieke warmte (warmte-inhoud) van lucht.

Uit deze relatie volgt dat de  $\Delta T$  een grote invloed heeft op de benodigde hoeveelheid koele lucht. In veel datacenters wordt gericht op een  $\Delta T$  van maximaal  $10^\circ\text{C}$ . Dit zorgt bij een ASHRAE 2011 Class A2-datacenter voor een maximale hot-zone-temperatuur van  $37^\circ\text{C}$ .

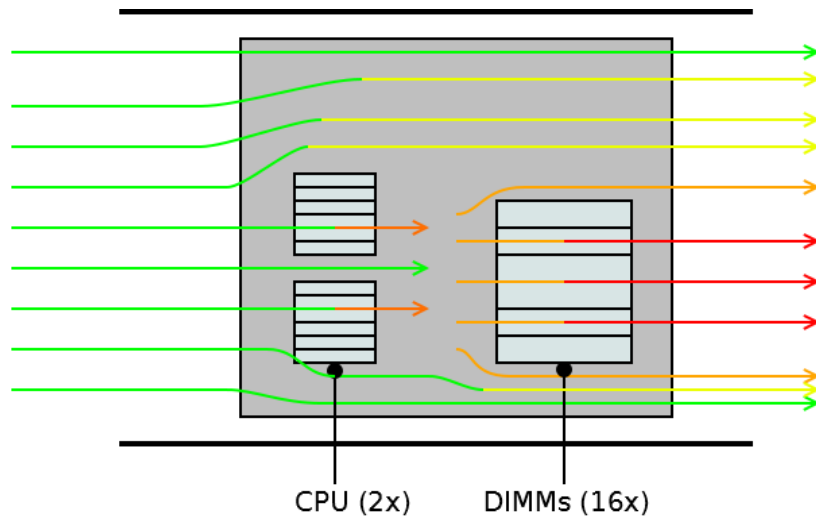
De bovengrens van de hot-zone temperatuur wordt hoofdzakelijk bepaald door het beperkte werkbereik van ondersteunende apparatuur als PDU's en switches. Deze hebben meestal een maximale temperatuur van  $45^\circ\text{C}$  (Kelley, Singh, Smith, & The Green Grid Technical Committee, 2012). Deze waarde van  $10^\circ\text{C}$  is een afweging tussen benodigd koelvermogen en het werkklimaat in de hot-zone.

Better.be gaat er echter vanuit dat er slechts sporadisch mensen aanwezig zijn in de hot-zone en richt op een  $\Delta T$  van  $12,5^\circ\text{C}$ . Dit levert een benodigd debiet op van  $250 \text{ m}^3/\text{kW}/\text{h}$ .



## Theoretisch model

In deze paragraaf zal een theoretisch model opgesteld worden van een te koelen server. Door middel van dit model zal te voorspellen zijn welke stroomsnelheid benodigd is om de CPUs voldoende te koelen, en welk drukverschil dit veroorzaakt. Hoe deze termen met elkaar samenhangen is te zien in Afbeelding 3.1, waar schematisch de luchtstroom door een server met omhuizing is afgebeeld.



Afbeelding 3.1: Versimpelde weergave van de luchtstroom door een server.  
Stromingsprofiel en opwarming van de lucht (koel = groen, warm = rood)

Het theoretische model bestaat uit de volgende onderdelen, die in de komende paragrafen stuk voor stuk behandeld zullen worden:

A) **Het koelvermogen van het koelblok**

Dit is afhankelijk van de stroomsnelheid en temperatuur van de lucht en de geometrie en materiaalsamenstelling van het koelblok

B) **De stromingsweerstand van het koelblok**

Dit is afhankelijk van de stroomsnelheid van de lucht en de geometrie van het koelblok.

C) **De verhouding tussen de luchtstroom door en langs het koelblok**

Dit is afhankelijk van de stroomsnelheid van de lucht en de geometrie van het koelblok en het chassis.

## Aannames

Bij het opstellen van dit model worden de volgende aannames gedaan, waarvan aanname 5 t/m 10 middels experimenten geverifieerd zullen worden.

- 1) Een server gebruikt onder *full load* 325W, dit is experimenteel geverifieerd bij Better.be volgens de methoden in *Bijlage 2: Meetmethoden voor stroomverbruik en efficiëntie*.
- 2) De afgevoerde warmte van een CPU onder full load ( $Q_{TDP}$ ) is gelijk aan de *Thermal Design Power* (TDP) en wordt volledig afgevoerd via het koelblok (Intel Corporation, 2007).
- 3) De thermische weerstand tussen de CPU-case en het koelblok is verwaarloosbaar doordat gebruik gemaakt wordt van een dun laagje sterk warmtegeleidende pasta tussen de processor en het koelblok.
- 4) De warmtestroom  $Q_{TDP}$  wordt enkel door middel van geforceerde convectie via het koelblok afgevoerd. De warmteoverdracht door middel van conductie en radiatie is verwaarloosbaar ten opzicht van de convectionele warmteoverdracht.(Cengel, 2002)
- 5) De geleiding (conductie) door de vinnen van het koelblok is gelijkmatig.(Simons, 2003)
- 6) Het stroomverbruik van de DIMMs (minder dan 2W per DIMM)(Fujitsu Microelectronics Ltd., 2008) is veel lager dan dat van de CPUs. De DIMMs zullen hierdoor minder warmte produceren en zullen, zolang de CPU voldoende gekoeld wordt, ook voldoende gekoeld worden.
- 7) Doordat de omhuizing van een server meestal uit glad plaatstaal gefabriceerd wordt, is de stromingsweerstand van de omhuizing verwaarloosbaar ten opzichte van de stromingsweerstand van het koelblok.
- 8) De overige componenten op het moederbord (condensatoren, chips en connectoren) zijn zo ruw, dat aangenomen kan worden dat hier geen lucht langs stroomt. Hierdoor wordt het moederbord bij de berekeningen als effectief 1cm hoger beschouwd.
- 9) Het stromingsprofiel van de ingaande luchtstroom is volledig ontwikkeld. Dit zal in een server niet altijd het geval zijn, maar is wel een randvoorwaarde van onderdelen van het theoretische model. Bij de verificatie van het model zal zorg gedragen moeten worden dat het stromingsprofiel volledig ontwikkeld is.
- 10) De stroming door de tunnel is non-compressiebel(Simmons, 1997)(Simons, 2003)(Loh & Chou, 2004); de verandering van luchtdichtheid als gevolg van druk- en temperatuurveranderingen is verwaarloosbaar. Door middel van de ideale gaswet is de volumeverandering van lucht als gevolg van druk- en temperatuursverandering van deze lucht te bepalen volgens Vergelijking 3.2 en 3.3. Een drukverlaging van 50Pa en temperatuurtoename van 25°C naar 47,5°C heeft bijvoorbeeld slechts een volumetoename van 4% tot gevolg, wat slechts een erg klein effect zal hebben op de gemeten stroomsnelheid en druk.

$$PV = nRT \quad (\text{Vergelijking 3.2})$$

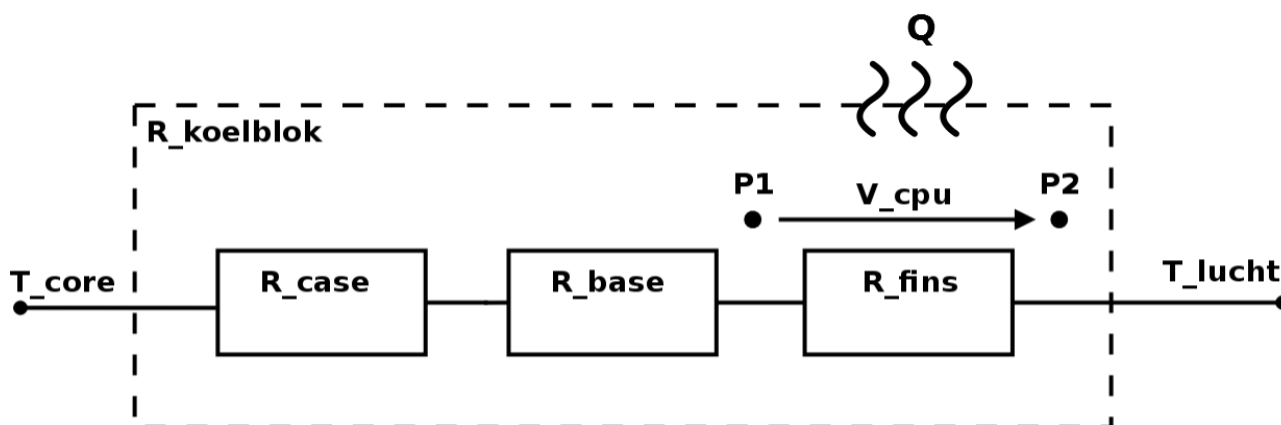
$$\Delta V = \frac{P_2 + P_{atm}}{nRT_2} - \frac{P_1 + P_{atm}}{nRT_1} \quad (\text{Vergelijking 3.3})$$

Hierbij is  $V$  het volume van de lucht,  $\Delta V$  het volumeverschil van de lucht,  $P$  de relatieve druk (Pa),  $P_{atm}$  de atmosferische druk (Pa),  $n$  de hoeveelheid gas (mol),  $R$  de gasconstante ( $J/(k \cdot mol)$ ) en  $T$  de absolute temperatuur (K)

- 11) De temperatuurverandering in de meetruimte is lineair tussen het begin en eind van een meetsessie. Het gemiddelde van de begin- en eindtemperatuur wordt als luchttemperatuur ( $T_{lucht}$ ) aangenomen. De temperatuursverandering in de meetruimte is een gevolg van de weersomstandigheden en de warmteontwikkeling van de geteste apparatuur.
- 12) De absolute luchtvochtigheid in de meetruimte aan het einde van een meetsessie is gelijk aan die aan het begin. De luchtvochtigheid is afhankelijk van het weer, en zal onder normale omstandigheden niet significant veranderen tijdens een meetsessie.

## Stap A: Het koelvermogen van het koelblok

Bij het voorspellen van de benodigde luchtstroom door een server dient eerst het koelvermogen van het koelblok bepaald te worden. Aan de hand van dit koelvermogen is af te leiden wat de relatie is tussen de temperatuur van de CPU-core ( $T_{core}$ ), en de temperatuur ( $T_{lucht}$ ) en snelheid ( $V_{cpu}$ ) van de langsstromende lucht. In Afbeelding 4.2 zijn de belangrijkste componenten van een koelblok en de samenhang van deze componenten weergegeven; deze zullen vervolgens afzonderlijk behandeld worden.



Afbeelding 3.2: Schematische weergave van het model voor de eigenschappen van een koelblok. Dit type model is analoog aan het elektrische domein. Hier wordt aangegeven hoe de thermische weerstand van een koelblok van invloed is op de temperatuurstroom

## Thermische Weerstand

De hoeveelheid warmte die door een koelblok wordt afgevoerd ( $Q_{TDP}$ ) is afhankelijk van de thermische weerstand tussen de bron en de omringende lucht:  $R_{koelblok} = (R_{case} + R_{base} + R_{fins})$  en het temperatuurverschil hiertussen ( $T_{core} - T_{lucht}$ ).  $R_{koelblok}$  is de thermische weerstand van het

koelblok,  $R_{case}$  de thermische weerstand van de processor-case,  $R_{base}$  de thermische weerstand van de basis van het koelblok en  $R_{fins}$  de thermische weerstand van de vinnen van het koelblok.

Tussen de processor-core en de basis van het koelblok bevindt zich de behuizing van de processor (case) met een thermische weerstand  $R_{case}$ . De weerstand van de case wordt niet door Intel gespecificeerd, maar is af te leiden uit het verschil tussen de maximale core-temperatuur ( $T_{coremax}$ ) en maximale case-temperatuur ( $T_{casemax}$ ), dat in het geval van de Intel X5355-processor 20°C bedraagt (Intel Corporation, 2007).

Volgens Intel wordt  $T_{coremax}$  meestal op het zelfde moment bereikt als  $T_{casemax}$  (Intel Corporation, 2007). Deze verhouding tussen  $T_{coremax}$  en  $T_{casemax}$  is slechts geldig als de processor op full-load draait. Uit dit temperatuurverschil is de thermische weerstand tussen core en case te berekenen worden volgens Vergelijking 3.4

$$R_{case} = \frac{T_{coremax} - T_{casemax}}{Q_{TDP}} \quad (\text{Vergelijking 3.4})$$

Hierbij is  $R_{case}$  de case-temperatuur van de processor,  $T_{coremax}$  de maximale processor-core-temperatuur zoals aangegeven door de processor,  $T_{casemax}$  de maximale processor-case-temperatuur en  $Q_{TDP}$  de warmtestroom naar het koelblok onder full load (Intel Corporation, 2007).

Bij het berekenen van de thermische weerstand worden de volgende aannames gedaan:

- De processor draait op full-load.
- De processor verbruikt 120W (Intel Corporation, 2007).
- Er is geen temperatuurverschil tussen de daadwerkelijke en gemeten  $T_{core}$ .

De thermische weerstand ( $R_{koelblok}$ ) van een heatsink is uit te drukken in functie van de geometrie (hoogte, breedte, lengte, het aantal vinnen en de dikte hiervan), materiaaltipe (warmtegeleiding) en de stroomsnelheid door de vinnen volgens Vergelijking 3.5: (Simons, 2003)

$$R_{fins} = \frac{1}{h * (A_{base} + N_{fin} * \eta_{fin} * A_{fin})} \quad (\text{Vergelijking 3.5})$$

Hierbij is  $h$  de warmtegeleidingscoëfficiënt ( $W/(mK)$ ),  $A_{base}$  het oppervlak tussen de vinnen ( $m^2$ ),  $N_{fin}$  het aantal vinnen,  $\eta_{fin}$  de efficiëntie van de vinnen en  $A_{fin}$  de oppervlakte hiervan ( $m^2$ ). De warmtegeleidingscoëfficiënt is een functie van de stroomsnelheid van de lucht, en de vin-efficiëntie is afhankelijk van de dikte van de vinnen en de warmtegeleidingscoëfficiënt van koelblok-materiaal.

Via deze thermische weerstand is de  $T_{core}$  van een processor met koelblok te bepalen, als functie van de temperatuur en stroomsnelheid van de lucht:

$$T_{core} = Q * R_{koelblok} + T_{lucht} \quad (\text{Vergelijking 3.6})$$

Hierbij is  $T_{core}$  de core-temperatuur van de CPU,  $Q$  de afgevoerde warmte van de CPU,  $R_{koelblok}$  de warmtegeleiding van het koelblok als functie van de stroomsnelheid en  $T_{lucht}$  de temperatuur van de langstromende lucht.

## Stap B: De stromingsweerstand van het koelblok

Aan de hand van de in *Stap A* berekende stroomsnelheid en de geometrie van het koelblok is te berekenen welke drukval, of stromingsweerstand, dit oplevert. Zoals te zien is in Afbeelding 5.2, veroorzaakt de stroming over de heatsink ( $V_{cpu}$ ) een drukverschil,  $P_2 - P_1$  ( $\Delta P$ ). Loh et al. hebben meerdere methoden voor het berekenen van deze drukval onderzocht en deze getoetst door middel van simulaties en windtunnel-experimenten (Loh & Chou, 2004).

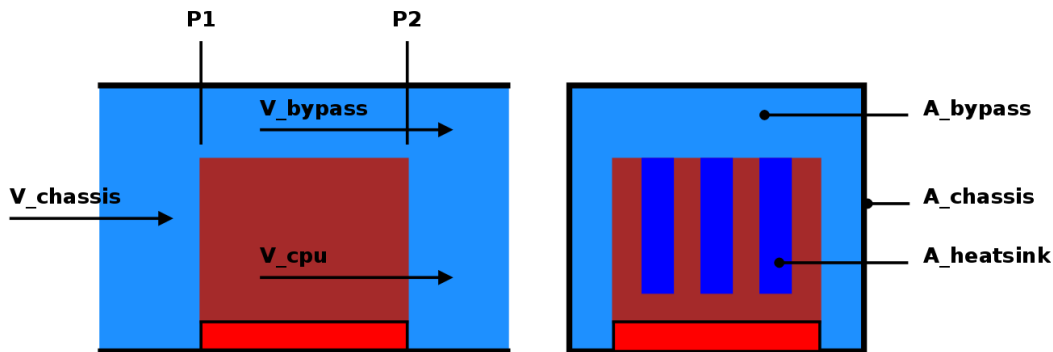
In dit model is de meest optimale methode van Loh en Chou toegepast, welke zeer accurate resultaten oplevert voor een koelblok van vergelijkbare geometrie. Via deze methode is het drukverschil over een koelblok te benaderen via:

$$\Delta P = \left( \frac{f_{app} N_{fin} (2H_{fin}L + bL)}{H_{fin}W} + K_c + K_e \right) \left( \frac{1}{2} \rho V_{cpu}^2 \right) \quad (\text{Vergelijking 3.7})$$

Hierbij is  $f_{app}$  de snelheidsafhankelijke wrijvingscoëfficiënt,  $N_{fin}$  het aantal vinnen,  $L$  de lengte van de vinnen (m),  $b$  de afstand tussen de vinnen (m),  $W$  de breedte van het koelblok (m),  $K_c$  en  $K_e$  de ingangs- en uitgangs-verliezen van de vinnen en  $V_{cpu}$  de stroomsnelheid door de vinnen van het koelblok (m/s).

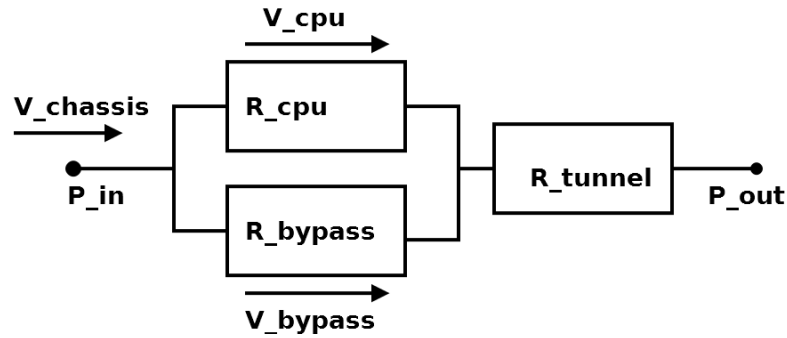
## Stap C: De verhouding tussen de luchtstroom door en langs het koelblok

Doordat het koelblok uit relatief smalle doorgangen bestaat is de stromingsweerstand van dit onderdeel erg hoog in vergelijking met de rest van de omhuizing. Dit betekent dat de stroomsnelheid door het koelblok ( $V_{cpu}$ ) veel lager zal zijn dan de stroomsnelheid door de omhuizing ( $V_{chassis}$ ). Dit is weergegeven in Afbeelding 5.3:



Afbeelding 3.3: Schematische weergave van de luchtstroom door en langs een koelblok.

De verhouding tussen deze twee stroomsnelheden is afhankelijk van de geometrie van de heatsink en behuizing ( $A_{heatsink}$ ,  $A_{bypass}$  en  $A_{chassis}$ ), en van de stroomsnelheid door het chassis ( $V_{chassis}$ ) (Lee, 1995; Simmons, 1997). Voor het berekenen hiervan wordt gebruik gemaakt van de methode van Simmons (Simmons, 1997). Hierbij wordt aangenomen dat de luchtstroom non-compressieel is, en de wrijving van de omhuizing verwaarloosbaar.



Afbeelding 3.4: Schematische weergave voor het model van de luchtstroom door een server. In deze afbeelding is ook de stromingsweerstand van de windtunnel ( $R_{tunnel}$ ) waarmee het model geverifieerd wordt weergegeven.

$$\frac{\rho V_{cpu}^2}{2g} + (P_2 - P_1) = \frac{\rho V_{bypass}^2}{2g} \quad (\text{Vergelijking 3.8})$$

$$V_{bypass} = \frac{A_{chassis} * V_{chassis} - A_{heatsink} * V_{cpu}}{A_{bypass}} \quad (\text{Vergelijking 3.9})$$

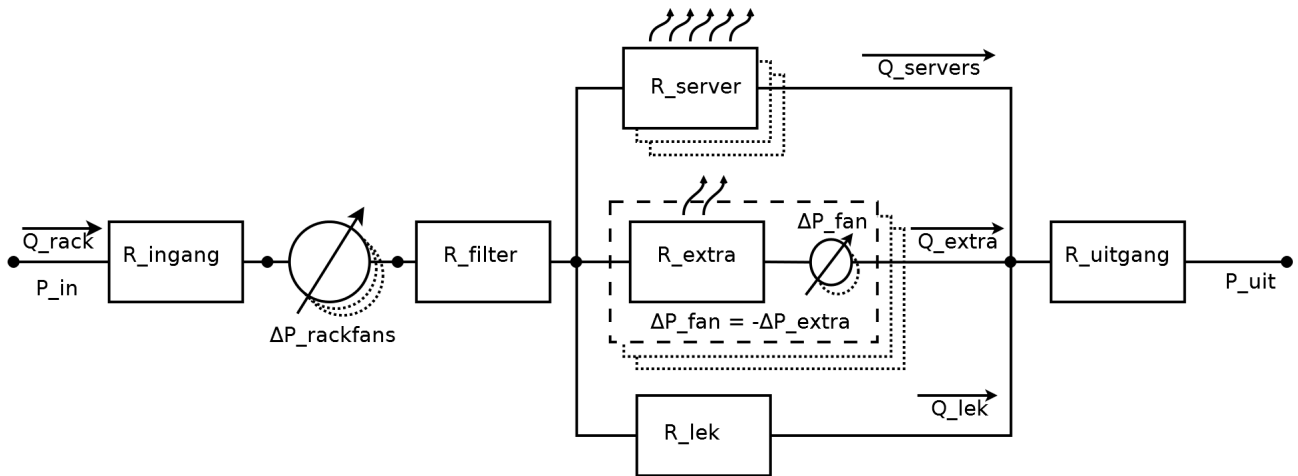
Hierbij is  $V_{bypass}$  de stroomsnelheid langs het koelblok,  $A_{bypass}$  het frontale oppervlak hiervan,  $A_{chassis}$  het frontale oppervlak van het chassis,  $A_{heatsink}$  het frontale oppervlak van het gebied tussen de vinnen,  $V_{cpu}$  de gemiddelde stroomsnelheid tussen deze vinnen,  $\rho$  de dichtheid van de lucht ( $\text{kg/m}^3$ ) en  $g$  de valversnelling ( $\text{m/s}^2$ )

## Samenvoegen tot een uiteindelijk theoretisch model

Door het in Afbeelding 3.2 en 3.4 weergegeven schema te combineren is een theoretisch model opgesteld waarmee de temperatuur van een processor-core ( $T_{core}$ ), en de drukval over een server ( $\Delta P$ ) te bepalen is als functie van de stroomsnelheid door deze server ( $V_{chassis}$ ). Dit model kan door middel van experimentele toetsing geverifieerd worden.

Bij de ontwikkeling van een nieuw serverchassis en een koelmethode hiervoor dient een goede balans gevonden te worden tussen de eisen aan de koeling (debiet en drukval), en temperatuur van de componenten in de server. Doordat alle apparatuur in het te ontwikkelen rack zijn eigen eisen stelt aan de koeling ontstaat een complex geheel.

Het theoretische model van een enkele server is uitgebreid naar een volledig rack. Hierbij is rekening gehouden met de koeling van de overige te plaatsen apparatuur, de ingangs- en uitgangsverliezen en de plaatsing van een eventuele filter of ventilator. Een schematische weergave hiervan is afgebeeld in Afbeelding 3.5:



Afbeelding 3.5: In deze afbeelding is het volledige weerstandsmodel van het rack weergegeven. De ventilatoren in het rack ( $\Delta P_{rackfans}$  en  $\Delta P_{fan}$ ) leveren een negatieve drukval. Door de werking van de ventilatoren in de extra aangesloten apparatuur ( $R_{extra}$ ) wordt hierdoor effectief geen drukval veroorzaakt, en kan het hiervoor benodigde debiet opgeteld worden bij de rest van het debiet van het rack.

Het gehele model is weergegeven in de volgende formules:

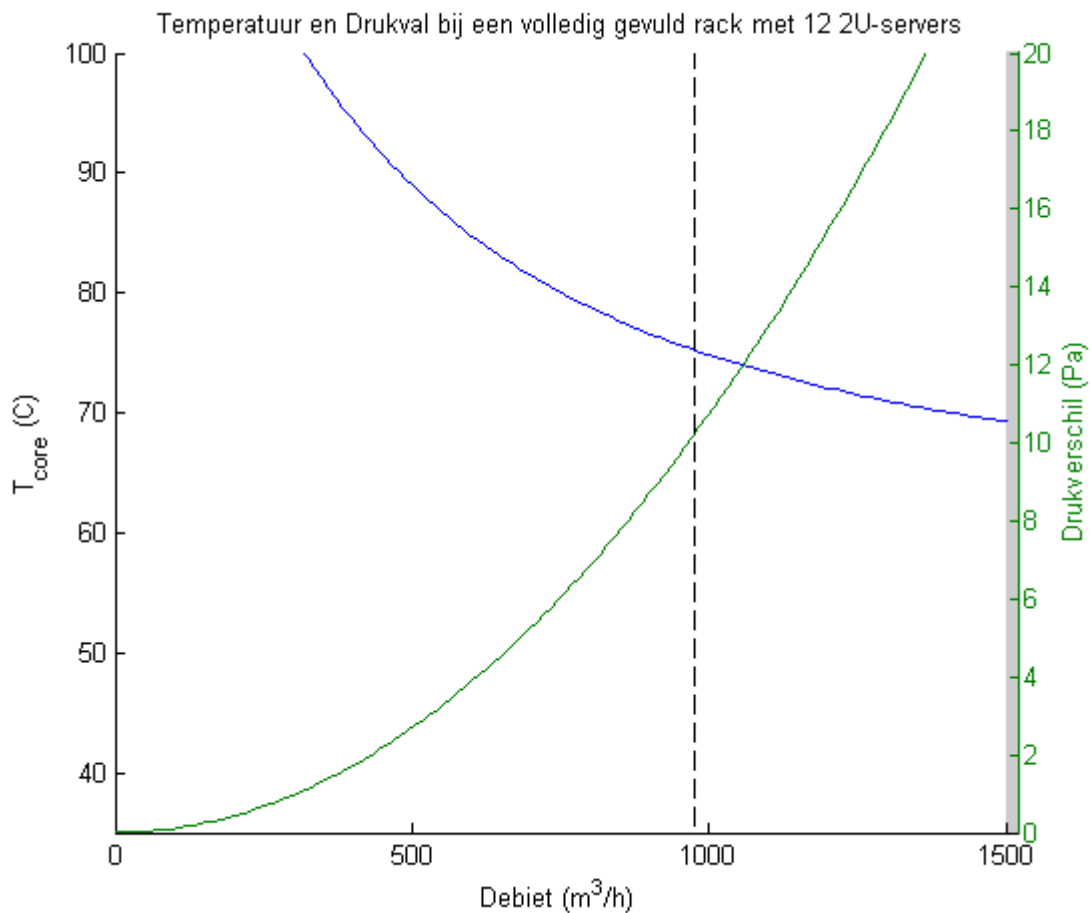
$$Q_{rack} = n_{server} * Q_{server} + Q_{extra} + Q_{lek} \quad (\text{Vergelijking 3.10})$$

$$\Delta P_{rack} = \Delta P_{ingang} - \Delta P_{rackfans} + \Delta P_{filter} + \frac{1}{1/\Delta P_{server} + 1/\Delta P_{lek}} + \Delta P_{uitgang} \quad (\text{Vergelijking 3.11})$$

Hierbij is  $Q_{rack}$  het debiet dat benodigd is voor het gehele rack,  $n_{server}$  het aantal servers,  $Q_{server}$  het voor de servers benodigde debiet,  $Q_{extra}$  het benodigde debiet voor de ondersteunende apparatuur en  $Q_{lek}$  het debiet dat langs de geplaatste apparatuur stroomt en niet bijdraagt aan de koeling.

$\Delta P_{rack}$  is de drukval over het gehele rack,  $\Delta P_{ingang}$  is het ingangsverlies veroorzaakt door de overgang van de ondervloerse ruimte naar het rack,  $-\Delta P_{rackfans}$  is de vermindering in drukval veroorzaakt door de ventilatoren,  $\Delta P_{filter}$  is de drukval veroorzaakt door het geplaatste filterpakket,  $\Delta P_{server}$  is de drukval over een server,  $\Delta P_{lek}$  is de drukval veroorzaakt door de lekken in het rack en  $\Delta P_{uitgang}$  is de drukval veroorzaakt door de overgang van de servers naar de buitenlucht.

In Afbeelding 3.6 is een voorbeeldberekening door met het opgestelde theoretische model voor de koeling van een volledig rack weergegeven. Hierbij zijn 12 2U-servers gebruikt met een 180mm brede duct en is 500W aan ondersteunende apparatuur geplaatst.



*Afbeelding 3.6: Benodigd debiet en veroorzaakte drukval voor de koeling van een volledig gevuld rack met 12 2U-servers met 180mm brede ducting en 500W extra apparatuur. Er is in dit rack geen filter of ventilator geplaatst.*

In Afbeelding 3.6 is het benodigde debiet en de veroorzaakte drukval te zien bij een volledig gevuld rack. Hieruit valt te concluderen dat de drukval over het ontwikkelde rack zeer laag is in vergelijking met reguliere oplossingen.



## **Experimentele Verificatie**

Om het opgestelde model te verifiëren is besloten een reeks experimenten uit te voeren. Het doel van deze experimenten is het verifiëren van de validiteit van het model, en het corrigeren van de volgende aannames:

- 1) De warmtestroom  $Q_{TDP}$  wordt enkel door middel van geforceerde convectie via het koelblok afgevoerd. De warmteoverdracht door middel van conductie en radiatie is verwaarloosbaar ten opzicht van de convectionele warmteoverdracht. (Cengel, 2002)
- 2) De geleiding (conductie) door de vinnen van het koelblok is gelijkmatig. (Simons, 2003)
- 3) De DIMMs hebben in verhouding tot de CPUs minder koeling nodig, en zullen, zolang de CPU voldoende gekoeld wordt, ook voldoende gekoeld worden.
- 4) De stromingsweerstand van de omhuizing en het moederbord is verwaarloosbaar ten opzichte met die van het koelblok.
- 5) De overige componenten op het moederbord (condensatoren, chips en connectoren) zijn zo ruw, dat aangenomen kan worden dat hier geen lucht langs stroomt. Hierdoor is het moederbord effectief 1cm hoger.
- 6) De ingaande luchtstroom is uniform en volledig ontwikkeld.

## **Opzet van experiment**

Om deze aannames te verifiëren is een windtunnel gebouwd die in staat is de luchtstroom door een enkele server na te bootsen. De bouw van deze windtunnel is beschreven in Bijlage 6, waar experimenteel wordt aangetoond wordt dat de windtunnel in staat is om de luchtstroom door een enkele server na te bootsen.

Voor de validatie van het model wordt een server met een 2U-form-factor (89mm x 483mm) en bijbehorende koelblokken gebruikt. Theoretisch gezien heeft deze form-factor een gunstige verhouding tussen koel-efficiëntie en power-density; de luchtsnelheid in dit chassis is de helft van de luchtsnelheid door een 1U-chassis. Hierdoor heeft Better.be een voorkeur voor dit type en is deze gebruikt om het model te verifiëren. De in dit experiment gebruikte server bestaat uit de volgende componenten:

- Moederbord: SuperMicro X7DBR-i+(SuperMicro Computer Inc, 2007)  
Dit servermoederbord beschikt over een tweetal CPU-sockets en 16 DIMM-slots. Het is met afstandhouders bevestigd op een stalen onderplaat.  
  
Het formaat van dit moederbord is 347mm x 330mm volgens de Enhanced Extended ATX-form-factor. Een groot deel van de moederborden die door SuperMicro worden uitgebracht voldoen aan deze standaard.
- Processoren: 2x Intel X5355(Intel Corporation, 2007)

Deze processoren hebben een maximaal opgenomen vermogen (TDP) van 120W per stuk. De maximale  $T_{case}$  van deze processoren is 70°C.

De 5300-serie processoren is in verhouding tot nieuwere Intel-processoren moeilijk te koelen. Alle nieuwere modellen stellen lagere eisen aan de thermische weerstand van het koelblok vanwege een gunstiger combinatie van warmteontwikkeling (TDP) en maximale temperatuur ( $T_{case}$ ). Bovendien zijn de koelblokken van SuperMicro voor nieuwere processorreeksen ±20% hoger dan de in dit experiment gebruikte exemplaren en zullen naar verwachting beter koelen (SuperMicro Computer Inc, 2014). Deze processor maakt dit experiment een *worst-case* scenario, waarbij aangenomen kan als de gebruikte processor voldoende gekoeld kan worden, dit voor nieuwere Intel-processoren ook het geval is.

- De processoren zijn voorzien van een SuperMicro SNK-0025P-heatsink met de volgende specificaties:

Afmetingen (BxLxH)	79mmx89mmx52mm
Materiaal	Vinnen: Aluminium Basis: Koper 2 Heatpipes
Aantal vinnen	46
Vindikte	0,6mm
Bevestigingsmethode	4x M6x15 met 7mm afstandshouder

Tabel 1: Eigenschappen van SuperMicro SNK-0025P

- Geheugen: 16x DDR2 DIMMs
- Voeding: 700W SuperMicro SP700-1R

Deze voeding is buiten de windtunnel geplaatst om de invloed hiervan op de luchtstroom te verminderen. Enkel de luchtstroom over het moederbord is relevant voor dit experiment, en mag niet vertekend worden door de invloed van de voeding. De voedingskabels zijn door middel van verlengkabels verbonden met het moederbord.

## Verwachtingen

Vervolgens is een drietal scenario's voor ducting (omhulling van de koelblokken) opgesteld welke als ijkpunten dienen voor de validatie van het model.

### A) Volledige Ducting (158mm x 89mm)

De koelblokken worden aan weerszijden volledig omsloten door een duct met de hoogte van een 2U-server.

### B) Halve Ducting (242mm x 89mm)

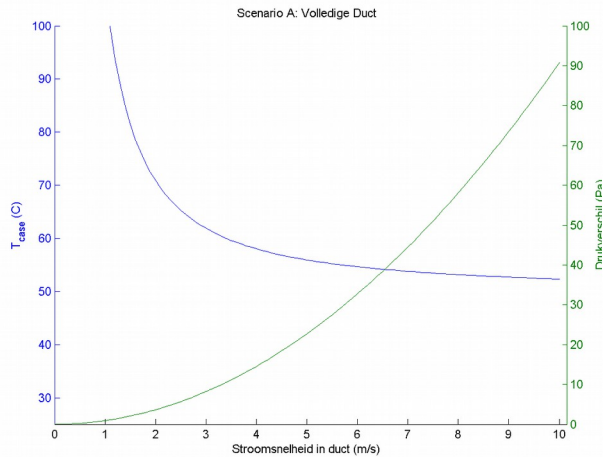
De koelblokken worden omsloten door ducting met een breedte gelijk aan de helft van een 19-inch server ( $483/2 = 242\text{mm}$ ). De koelblokken bevinden zich in het midden van de duct.

### C) Geen Ducting (483mm x 89mm)

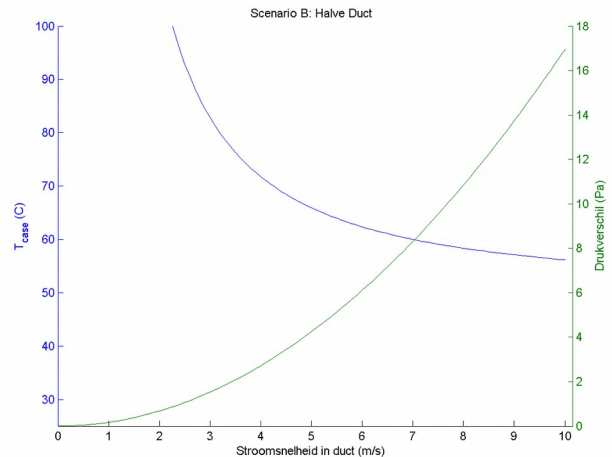
De koelblokken worden niet omsloten door ducting. Hierbij bevindt de server zich in een

kale 2U-omhuizing.

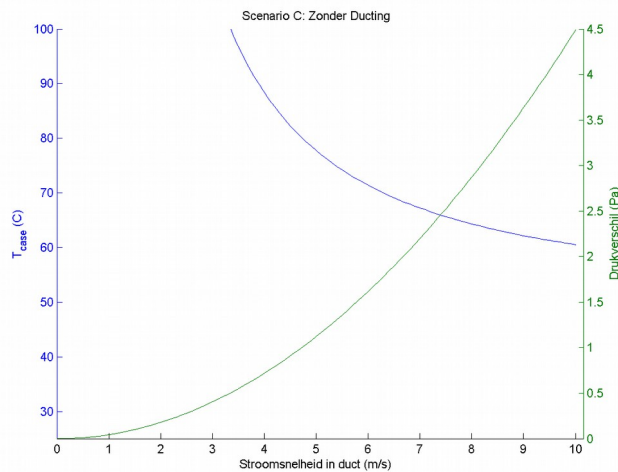
Van deze scenario's wordt op basis van het theoretische model een verband tussen stroomsnelheid, temperatuur en druk verwacht zoals afgebeeld in Afbeelding 3.7, 3.8 en 3.9. Hier is te zien dat de drukval over een server toeneemt sterker toeneemt bij toenemende stroomsnelheid. De processor-temperatuur daalt snel bij toenemende stroomsnelheid en stabiliseert daarna.



Afbeelding 3.7: Verwachte  $T_{case}$  en  $\Delta P$  voor Scenario A: Volledige Duct.



Afbeelding 3.8: Verwachte  $T_{case}$  en  $\Delta P$  voor Scenario B: Halve Duct



Afbeelding 3.9: Verwachte  $T_{case}$  en  $\Delta P$  voor Scenario C: Geen Ducting

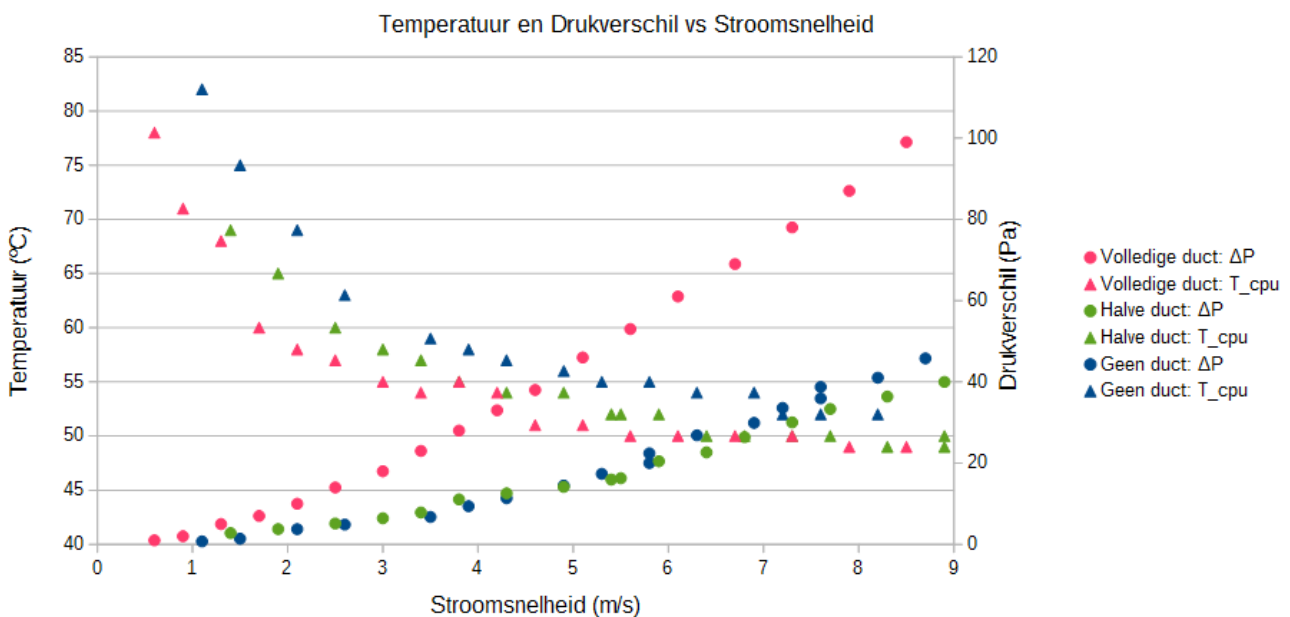
## Resultaten

Van elk van de scenario's, waarbij de afmetingen van de ducting is gevarieerd, is  $T_{core}$ ,  $T_{DIMM}$  en  $\Delta P_{chassis}$  bepaald als functie van  $V_{chassis}$ . De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Tabel 3.10. Hierin is te zien dat het toepassen van ducting rond een koelblok resulteert in een lagere  $T_{core}$ , en een hogere  $\Delta P_{chassis}$ , wat in lijn is met de theorieën van de stromingsleer. De meetmethoden en resultaten worden uitgebreid behandeld in Bijlage 7.

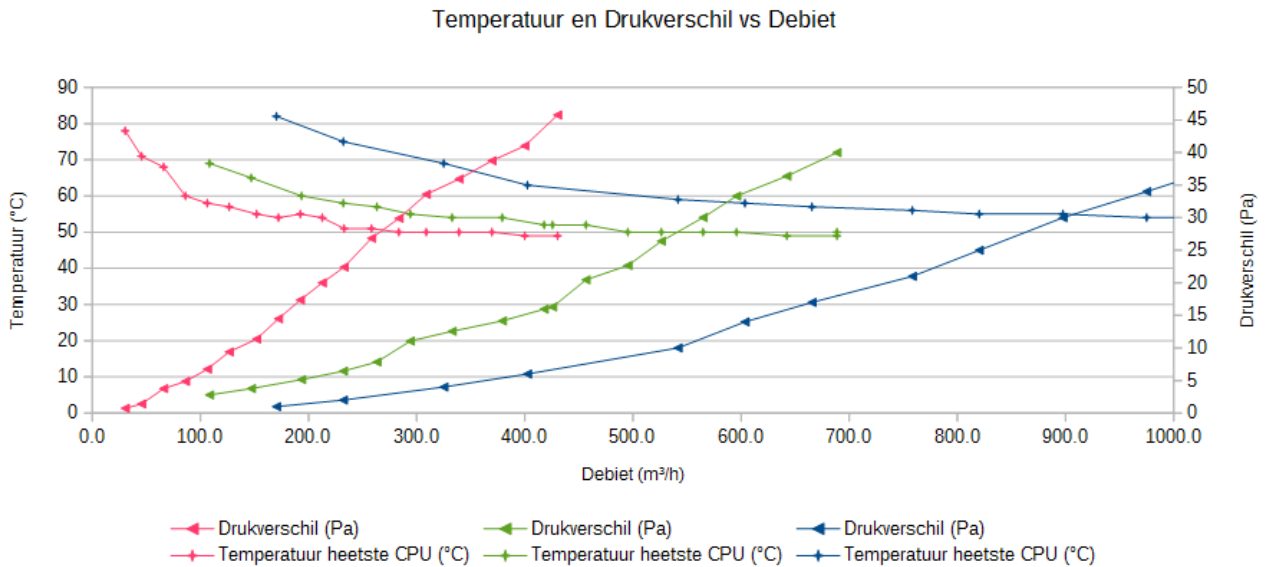
De temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in de meetruimte tijdens de metingen is weergegeven in onderstaande tabel.

Scenario	Starttemperatuur	Eindtemperatuur	Relatieve Luchtvochtigheid
A: Volledige ducting	23,4°C	23,4°C	64,3%
B: Halve ducting	21,6°C	22,1°C	66,2%
C: Geen ducting	22,9°C	23,6°C	63,4%

Tabel 3.1: Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in de meetruimte.

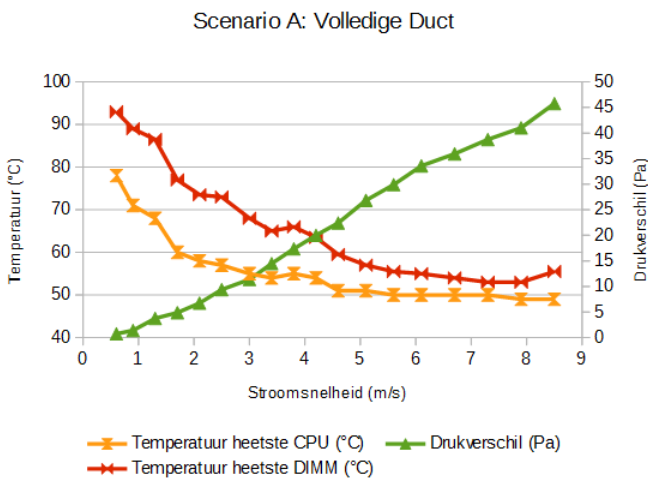


Afbeelding 3.10: Gemeten temperatuur en drukverschil bij 3 scenario's als functie van stroomsnelheid. In deze afbeelding is te zien dat de drukval over een server toeneemt bij stijgende stroomsnelheid. Als gevolg hiervan wordt ook de processor beter gekoeld.

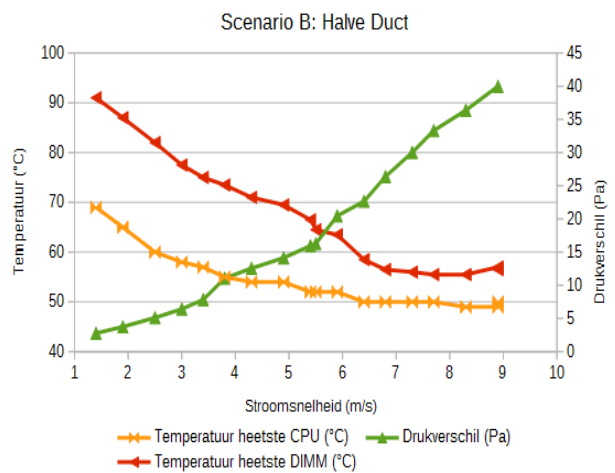


Afbeelding 3.11: Gemeten temperatuur en drukverschil bij Scenario A (rode lijn), Scenario B (groene lijn) en Scenario C (blauwe lijn) als functie van debiet. In deze afbeelding zijn dezelfde meetresultaten weergegeven als in Afbeelding 3.10, maar met een andere X-as.

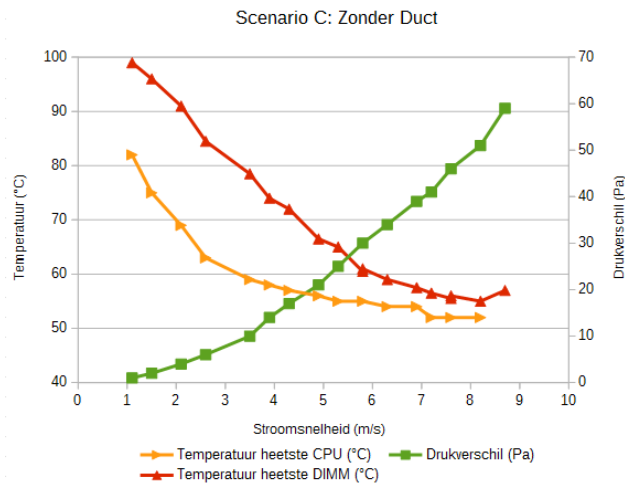
In Afbeelding 3.11 is voor de drie scenario's (Volledige, Halve en Geen Ducting) de temperatuur van de heetste CPU en de drukval over het moederbord weergegeven. In deze afbeelding is te zien dat een grotere duct een hoger debiet vereist om de processor op een acceptabele temperatuur te houden. De meetreeks van Scenario B (Halve Duct) is gestaakt voordat de maximale CPU-temperatuur bereikt werd doordat de maximale DIMM-temperatuur eerder bereikt werd.



Afbeelding 3.12: Gemeten CPU- en DIMM-temperatuur en drukverschil als functie van stroomsnelheid



Afbeelding 3.13: Gemeten CPU- en DIMM-temperatuur en drukverschil als functie van stroomsnelheid



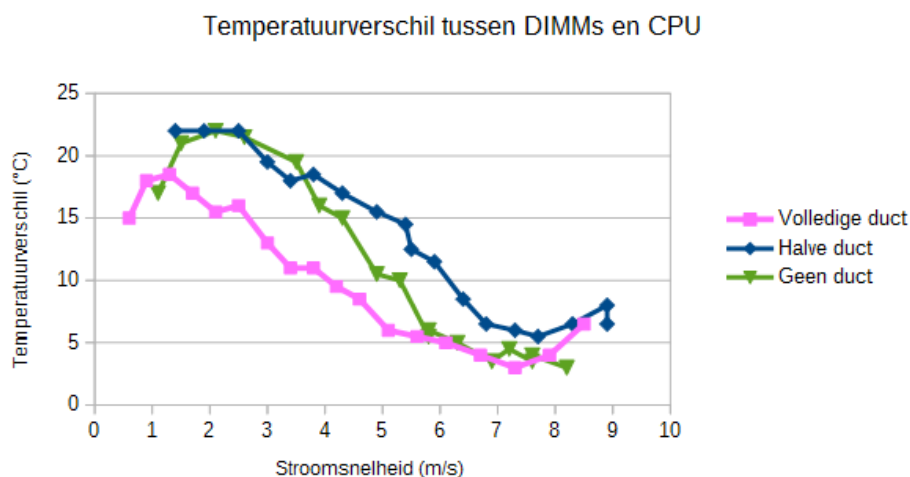
Afbeelding 3.14: Gemeten CPU- en DIMM-temperatuur en drukverschil als functie van stroomsnelheid

## Discussie

- **Temperatuurverschil tussen CPU en DIMMs**

Uit de experimenten met de windtunnel blijkt dat de DIMMs meer koeling nodig hebben dan verwacht en consequent warmer zijn dan de CPUs. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de DIMMs meer warmte blijken te produceren dan is verwacht, en vanwege hun kleine koelribben moeilijker te koelen zijn. Bovendien bevinden de DIMMs zich na de CPU's, waardoor de luchtstroom reeds is opgewarmd.

Uit Afbeelding 3.15 blijkt dat dit verschil vooral optreedt bij lagere stroomsnelheden. In het scenario met volledige ducting is de koeling van de DIMMs beter, dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de luchtstroom met relatief hoge snelheid uit de duct komt en daardoor over de DIMMs wordt geblazen.



Afbeelding 3.15: Temperatuurverschil tussen DIMMs en CPU voor 3 scenario's, zoals afgeleid uit de gedane metingen

- **Hogere drukval**

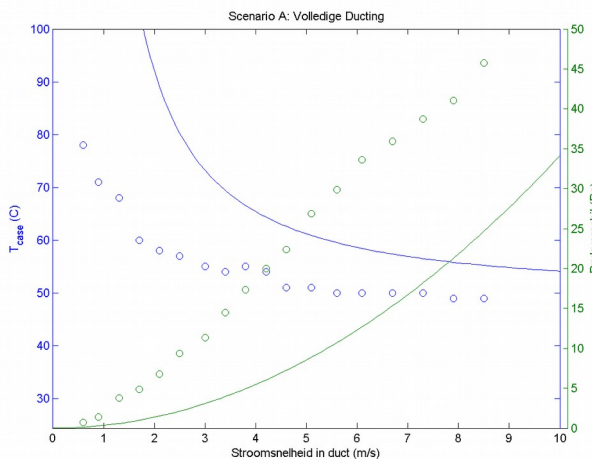
De drukval over het moederbord is hoger dan in eerste instantie verwacht. Dit komt waarschijnlijk doordat niet aangenomen kan worden dat er geen lucht stroomt over de overige componenten van het moederbord. De lucht die hier toch overheen stroomt veroorzaakt waarschijnlijk extra verstoringen van de luchtstroom in de tunnel, wat een hogere drukval tot gevolg heeft.

## Revisie van het theoretisch model

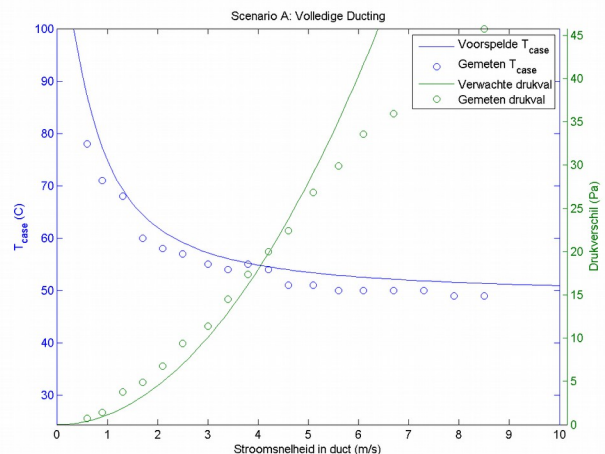
Uit het experiment blijkt dat middels het model gemaakte voorspellingen op enkele punten afwijken van de gemeten waarden. Deze afwijking wordt veroorzaakt doordat bij de initiële aannames enkele effecten zijn verwaarloosd:

- De wrijving van de omhuizing blijkt een grotere invloed te hebben op het drukverschil dan verwacht.
- Er vindt naast warmtetransport door middel van geforceerde convectie (luchtstroom over het koelblok) ook warmtetransport plaats via conductie (geleiding via de bevestigingsmaterialen).

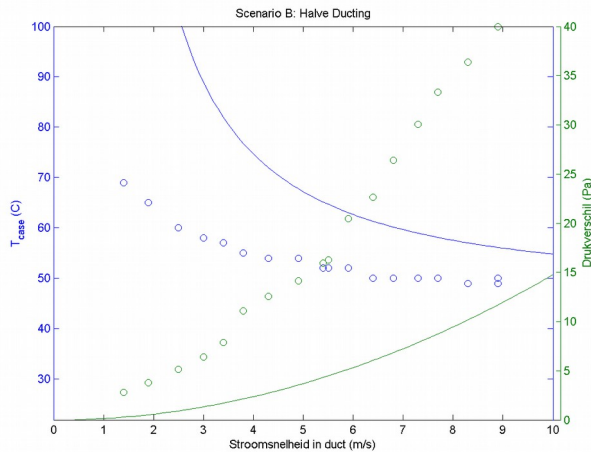
In Bijlage 8 is stap voor stap uitgelegd hoe het model is aangepast om rekening te kunnen houden met deze effecten. In Afbeelding 3.16 t/m 4.20 wordt het initiële- en uiteindelijke model met elkaar vergeleken.



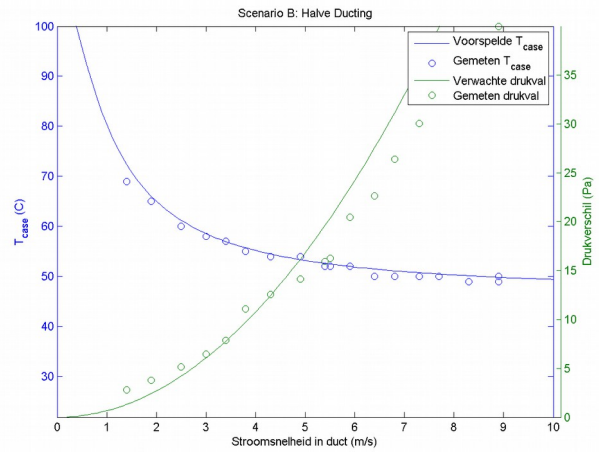
Afbeelding 3.16: Gemeten en verwachte temperatuur en drukval bij Scenario A, waarbij gebruik gemaakt wordt van het initiële model.



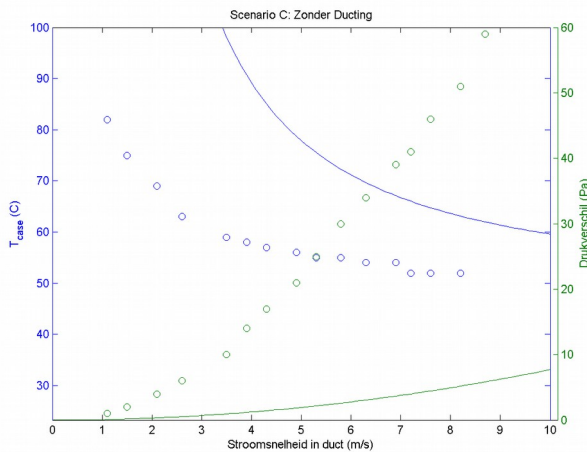
Afbeelding 3.17: Gemeten en verwachte temperatuur en drukval bij Scenario A, waarbij gebruik gemaakt wordt van het gereviseerde model.



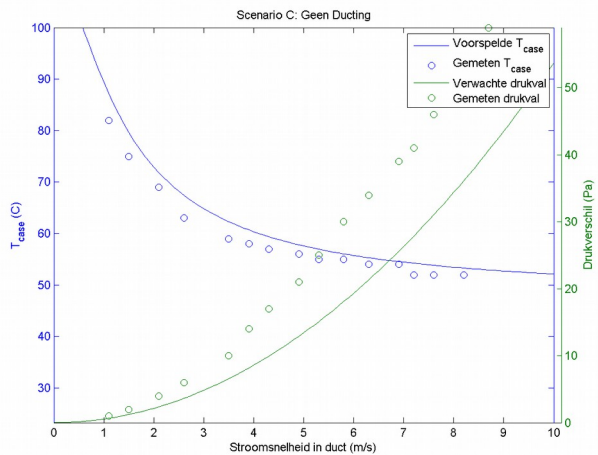
Afbeelding 3.18: Gemeten en verwachte temperatuur en drukval bij Scenario B, waarbij gebruik gemaakt wordt van het gereviseerde model.



Afbeelding 3.19: Gemeten en verwachte temperatuur en drukval bij Scenario B, waarbij gebruik gemaakt wordt van het gereviseerde model.



Afbeelding 4.19: Gemeten en verwachte temperatuur en drukval bij Scenario C, waarbij gebruik gemaakt wordt van het gereviseerde model.



Afbeelding 4.20: Gemeten en verwachte temperatuur en drukval bij Scenario C, waarbij gebruik gemaakt wordt van het gereviseerde model.

## Conclusie

Het theoretische model is na de in Bijlage 8 beschreven revisie accuraat genoeg om het koelgedrag van een server en de drukval hierover te kunnen voorspellen. De voorspellingen voor de CPU-temperatuur van Scenario A en C zijn enkele graden hoger dan de gemeten waarden. Dit zal echter geen probleem vormen, omdat deze hogere voorspelde temperatuur zal leiden tot een beter gekoelde processor, met als nadeel een kleine toename in drukval.



## **4 Ontwerp van het rack**

### ***Ontwerpdoel***

Op basis van de door Better.be gestelde eisen en het verwachte gebruik is een Programma van Eisen (PvE) opgesteld, waaraan het te ontwerpen rack zal moeten voldoen. Dit PvE is toegevoegd in Bijlage 1. Hieruit is af te leiden welke functionaliteit het rack zal moeten bieden, en geeft indicatie van het te volgen ontwerpproces. De onderdelen waar dit ontwerpproces zich op zal richten zijn hieronder kort beschreven:

### **Stroomvoorziening**

Het rack zal de geplaatste apparatuur een constante, zeer efficiënte stroomvoorziening moeten bieden. Dit betekent dat het rack op de primaire- en secundaire stroombronnen aangesloten moet worden, en bij uitval van beide stroombronnen in staat moet zijn om de hierop aangesloten apparatuur 5 minuten te voeden. Bovendien mag het falen van een van de onderdelen in deze keten het functioneren van de datacenter-stroomvoorziening niet in gevaar brengen.

### **Koeling**

Er zal een manier ontwikkeld moeten worden om de geplaatste servers voldoende te koelen. Vanwege het hoge energieverbruik van de geplaatste apparatuur is hier waarschijnlijk veel lucht voor benodigd. Er zal een manier ontwikkeld moeten worden om deze koeling zo efficiënt mogelijk te laten gebeuren. Ook mag het falen van een van de onderdelen van dit koelsysteem de koeling van de in het rack geplaatste apparatuur niet in gevaar brengen.

### **Huisvesting servers**

Het rack zal plaats moeten bieden aan minimaal 12 servers, de benodigde netwerkapparatuur en andere ondersteunende onderdelen. Deze onderdelen moeten met minimale moeite geplaatst en vervangen kunnen worden. Bovendien moet de constructie hiervan een minimale belemmering vormen voor de luchtstroom van de koeling.

### **Constructie rack**

Het rack moet plaats bieden aan alle hierboven genoemde apparatuur en geschikt zijn voor een datacenter met een tegelgrootte van 60x60cm. Het rack dient door twee personen naar de uiteindelijke locatie vervoerd te kunnen worden en moet ter plaatse binnen een korte tijd gevuld kunnen worden met apparatuur. Hiernaast moet het rack stevig genoeg zijn om bij een enkel server-bevestigingspunt 70kg te kunnen dragen.

## **Ontwerpvoorstellen**

In dit deel worden een aantal keuzes en opties gepresenteerd voor het uiteindelijke ontwerp van een nieuw type server-rack voor gebruik in een datacenter van Better.be. Een deel van de ontwerpkeuzes zijn geplaatst in de bijlagen, omdat dit vertrouwelijke informatie betreft. Overzichtsweergaven van enkele conceptontwerpen zijn toegevoegd in confidentiële Bijlage 11.

## ***Stroomvoorziening***

Uit het onderzoek naar de stroomvoorziening is gebleken dat de 12V-LFP-oplossing grote besparingen kan opleveren met betrekking tot kostprijs en lopende kosten. De in confidentiële Bijlage 4 uitgewerkte oplossing zal ondergebracht moeten worden in het te ontwerpen rack.

1. Het rack dient plaats te bieden aan 2 GE Energy power-shelfs, waarbij ruimte vrijgehouden dient te worden voor de 230V- en 12V-bekabeling.
2. Het rack dient plaats te bieden aan een 230V-wisselschakelaar gebaseerd op een relais en PLC.
3. Het rack dient plaats te bieden aan 4 ANJCell LFP-accu's, welke individueel vervangen moeten kunnen worden.
4. Om veilig 6000W bij 12V te kunnen leveren dient de busbar minimaal dubbel uitgevoerd te zijn, waarbij elke busbar slechts een deel van het vermogen levert.
5. Het rack dient plaats te bieden aan een dubbele 500W, 12Vdc-230Vac inverter.

Op basis van de berekende efficiënties van verschillende mogelijkheden voor stroomvoorziening, is besloten de 12V-LFP topologie verder uit te werken. Deze biedt door het geringe aantal stappen in de keten een zeer hoge efficiëntie.

Een gedetailleerde omschrijving van de uitwerking van dit onderdeel is te vinden in confidentiële Bijlage 4

## ***Koeling***

De verwachtingen ten opzichte van het koelgedrag van het ontwerp zijn erg gunstig. In het meest ongunstige geval, waarbij het koelblok bijna volledig omsloten is door ducting, is de stromingsweerstand de helft van een regulier 2U-chassis. Zie voor verdere uitwerking van het verwachte koelgedrag Bijlage 9.

## ***Keuze voor ducting***

Op basis van voorspellingen middels het theoretisch model zijn een aantal praktisch toepasbare ducting-opties overwogen. Deze zijn verder uitgewerkt in confidentiële Bijlage 10.

## ***Plaatsing van servers en overige componenten***

Op basis van de ducting-opties is een aantal methoden overwogen voor de plaatsing van de servers en overige componenten in een rack. Deze methoden zijn verder uitgewerkt in confidentiële Bijlage 10.

### ***Filtering van ingaande lucht***

Het rack zal beschikken over over een luchtfilter met een drukval van minstens 20Pa. Dit filter is geplaatst helemaal onderin het rack. Hierdoor wordt de instromende lucht gereinigd, wat de levensduur van de geplaatste apparatuur zal verlengen. Een bijkomend voordeel van dit filterpakket is dat het ongelijkmatigheden in de instromende lucht vermindert, waardoor afwijkingen in de ondervloerse luchtstroom teniet gedaan worden en de luchtstroom over de servers gelijk is.

Een bijkomend voordeel van dit filterpakket is dat de luchtstroom door de ondervloer van het datacenter ook gelijkmatiger wordt; de de lucht wordt zo beter verdeeld over de racks. Normaal gesproken worden geperforeerde vloertegels toegepast, waarbij veelal 60x60cm tegels met een perforatie van 25% gebruikt worden. De drukval over deze tegels zorgt ervoor dat het debiet door 68% van de geplaatste tegels minder dan 10% afwijkt van het gemiddelde van de gehele vloer. (VanGilder & Schmidt, 2005) Een perforatie-niveau van 25% zorgt bij het benodigde debiet van een volledig gevuld rack (1116 m<sup>3</sup>/h) voor een drukval van 25Pa.(Patankar, 2010)

Om een vergelijkbare verdeling te verkrijgen in een datacenter gevuld met de ontworpen racks zal elk rack dus een drukval van minstens 25Pa moeten veroorzaken.

### ***Autonome koeling***

Om de geplaatste apparatuur ten alle tijde van voldoende lucht te kunnen voorzien is een viertal 220mm temperatuurgestuurde 12Vdc ventilatoren geplaatst, welke via sledes per twee ventilatoren onder het rack geschoven kunnen worden. Deze ventilatoren zijn elk aangesloten op een andere 12V-busbar en worden zo beschermd tegen stroomuitval. Als de koeling van het datacenter onvoldoende capaciteit kan leveren om het rack voldoende te koelen zullen de ventilatoren deze taak overnemen.

(“Super Micro Riser Cards,” n.d.)Bekabeling van afzonderlijke servers

Doordat de servers met de achterzijde naar boven steken zijn de connectors voor netwerkkabels en andere randapparatuur goed bereikbaar. Better.be maakt bij al zijn servers gebruik van minstens 3 netwerkkabels per server (primaire en secundaire netwerkkaart, en out-of-band management). Het aansluiten van deze bekabeling is een zeer tijdrovende taak waarbij fouten ernstige gevolgen kunnen hebben. Om deze reden wordt in dit rack gebruik gemaakt van een geïntegreerde kabelboom. Deze op maat gemaakte kabelboom heeft een gelabelde aftakking voor elke server, welke uiteindelijk uitmondt in drie met kleur gecodeerde netwerkkabels. Voor de overige kabels beschikt het rack over een kabelgoot.

### ***Materiaalkeuze***

Dit rack wordt in tegenstelling tot reguliere datacenter-racks niet uit staal opgetrokken. Door het

ontwerp van het rack, is het minder hoog dan een regulier datacenter-rack. Ook is de geplaatste apparatuur minder zwaar dan gebruikelijk is, omdat er geen chassis omheen zitten. Door deze twee factoren worden minder hoge eisen gesteld aan de stevigheid van het rack.

Hierdoor is het mogelijk om relatief goedkope materialen en productieprocessen toe te passen. Doordat het rack grofweg als een ruwe kubus te beschouwen is zijn er twee fundamentele elementen te herkennen: Wanden en hoekverbindingen.

## Wanden

- **Kunststof plaatmateriaal (plexiglas, polycarbonaat of een plexiglas/PVC-copolymeer)**  
Kunststoffen zijn op mechanisch vlak een uitstekende kandidaat voor de wanden van het rack. Kunststof is licht en stevig. Het nadeel aan deze typen materialen is echter de hoge elektrische weerstand. Zeker in een datacenter-omgeving zal dit voor de opbouw van statische elektriciteit kunnen zorgen, met schade aan electronica of brand tot gevolg.
- **Multiplex**  
Multiplex is een composiet, dat gemaakt is door meerdere lagen dun houtfijnere onder hoge druk te verlijmen. Het resultaat is een zeer sterk constructiemateriaal dat, in tegenstelling tot normaal hout, weinig krimp en rek vertoont. Ook is de buigsterkte minder richtingsafhankelijk.  
Multiplex is verkrijgbaar met verschillende soorten oppervlaktebehandelingen om de duurzaamheid te verhogen. Hiervan is HPL (high pressure laminate) het meest interessant, aangezien dit type coating een anti-statische werking heeft (Tate Inc, 2014).  
Voor het ontwerp van het rack gaat de voorkeur uit naar multiplex.

## Hoekverbindingen

- **Aluminium extrusieprofielen (Bosch Rexroth)**  
Dit type extrusieprofiel wordt breed toegepast binnen de machine- en standbouw. Het is stevig en lichtgewicht en heeft kost ongeveer €12,33/m excl. BTW. (RS-Online, 2014).
- **Aluminium extrusieprofielen (Penn Elcom flightcase profielen)**  
Dit type extrusieprofiel wordt veel gebruikt bij de constructie van koffers en omhuizingen voor instrumenten. Het is in vergelijking met het Bosch Rexroth-profiel van zichzelf niet stevig, maar vormt in combinatie met stevige Multiplex-wanden een solide geheel. De flightcase profielen zijn goedkoper dan de Bosch Rexroth-alternatieven met een rond de €4,16/m excl. BTW (Penn Elcom Direct GmbH, 2014).

## Vervoer

Het rack biedt de mogelijkheid om vervoerd te worden door middel van een pompwagen of heftruck. Aan de onderzijde van de racks zijn naar Europallet-specificaties uitsparingen aangebracht. Dit heeft als voordeel boven het vervoer met wielen dat er minder versteviging benodigd is onderin het rack. Ook maakt deze manier van vervoeren het eenvoudiger om een serie racks uit een vrachtwagen te laden en over een reeks drempels naar de datacentervloer te

verplaatsen.

## **Kostenberekening**

### **Aanschafkosten Stroomvoorziening**

In onderstaande tabel is een prijsschatting gegeven van de kosten van de stroomvoorziening van de verschillende alternatieven. Om een eerlijke vergelijking te kunnen geven tussen beide opties is bij aanschafkosten van de gekozen componenten uitgegaan van online beschikbare prijsinformatie, excl BTW, invoerkosten en leveringskosten. De prijzen van de Gamatronic-apparatuur is afkomstig van NTC Network(NTC Network AS, 2013) en de prijzen van de APC-apparatuur zijn van APC zelf afkomstig(American Power Conversion, 2013). Voor de overige producten is de goedkoopste leverancier gekozen via Octopart.com(Octopart.com, 2014). Bij het nieuw te ontwikkelen rack is €400,- gebudgetteerd voor onvoorziene kosten. Better.be zal in staat zijn om bij zijn leveranciers kortingen te bedingen op deze kosten. Van de nieuwe oplossing is de te bedingen korting echter onbekend.

<b>Onderdeel</b>	<b>Fabrikant</b>	<b>Product</b>	<b>Aantal</b>	<b>Prijs/ stuk (€)</b>	<b>Totaal- prijs (€)</b>
UPS STS & Controller	Gamatronic	Power+ FS	1	3213	3213
UPS Module	Gamatronic	Power+ FS 10kVA	5	1012	5060
UPS Accurack	Gamatronic	Power+ 64x20AH-10-50K-864V	1	1838	1838
UPS 12V18Ah deep-cycle VRLA	YUASA	NP18.0-12V	64	63	4032
42U Rack	APC	NetShelter SV AR2500	6	958	5748
32A Rack ATS	APC	AP7724	6	793	4758
32A Rack PDU	APC	AP8853	12	217	2604
2U Chassis	SuperMicro	CSE213LT-563LPB	70	321	23112
<b>Totaalprijs per 6 racks</b>					<b>50.365</b>
<b>Prijs per rack</b>					<b>8394</b>

Tabel 4.1: Geschatte aanschafkosten voor de 230Vac-oplossing.

Onderdeel	Fabrikant	Product	Aantal	Prijs/stuk (€)	Totaalprijs (€)
Power Shelf	GE Energy	ACE125	12	293	3510
AC/DC Converter	GE Energy	CAR0812FP	48	225	10.786
UPS Accu	ANJCell	12V40Ah LFP-accu's	24	167	3006
Scheidingsdiodes	IXIS Semiconductor	2x40A Schottky	48	18,13	870
Inverters			12	120	1440
Busbar	Siemens	8GK9733- 0KK50	24	156	3744
Metered PDU	Gude	Expert PDU Energy 8310	12	182	2184
Chassis		Rack-slede	70	20	1400
ATS			6	200	1200
Accu-lader			6	250	1500
Multiplex		Berken HPL	24m <sup>2</sup>	34,67/m <sup>2</sup>	832
Profielen		Penn Elcom	60m	2,48/m	149
Onvoorziene Kosten			6	400	2400
<b>Totaalprijs voor 6 racks</b>					<b>33.020</b>
<b>Prijs per rack</b>					<b>5503</b>

Tabel 4.2: Geschatte aanschafkosten voor de 12Vdc-LFP Oplossing.

## Besparingen wegens koeling

Door middel van de ontwikkelde koelmethode zijn grote kostenbesparingen te realiseren. De duidelijkste reden hiervan is de zeer lage luchtweerstand in de keten van koeling. Deze is zelfs zo laag, dat het luchtfilter in de rack-inlaat de beperkende factor is geworden. Om een volledig gevuld rack waarvan de apparatuur 6kW verbruikt te koelen bij een  $\Delta T$  van 12,5°C en 0% luchtvochtigheid, is een debiet van 1116m<sup>3</sup>/h benodigd. Bij toepassing van een luchtfilter met een voor goede luchtverdeling minimale weerstand, zal hierdoor een drukverschil van 25Pa ontstaan.

Het verbruikte ventilatorvermogen van een afzonderlijke server wordt bepaald aan de hand van het door de fabrikant opgegeven vermogen van de lokaal in de server geplaatste ventilatoren. Uit tests bij Better.be blijkt dat het door de fabrikant opgegeven vermogen overeenkomt met het daadwerkelijk gebruikte vermogen bij de omstandigheden in het datacenter van Better.be.

## Bepaling van het huidige verbruikte ventilator-vermogen

- **Lokaal ventilatorvermogen**

In de huidige situatie beschikken de in het datacenter geplaatste servers over lokale ventilatoren. Het verbruik van deze ventilatoren wordt bepaald aan de hand van het ventilatorvermogen van de voor dit onderzoek geteste server. Het datacenter van Better.be bevat hoofdzakelijk 1U-servers waarvoor een vergelijkbare hoeveelheid ventilatorvermogen benodigd zal zijn.

De geteste server beschikt over een drietal Nidec UltraFlo 40mm-ventilatoren (zie Afbeelding 4.1) met een opgegeven vermogen van 9,6W. Het lokale ventilatorvermogen van een server is de som van het vermogen van de afzonderlijke ventilatoren:  $3 * 9,6 = 28,8W$ .



Illustration 4.1: Nidec UltraFlo 40mm ventilator

Als het datacenter gevuld zou zijn met enkel vergelijkbare servers is de som van het lokale ventilatorvermogen van alle geplaatste servers te bepalen via vergelijking 4.1. Dit levert een totaal ventilatorvermogen op van 4617W.

$$\sum^{DC} P_{lok-vent} = P_{lok-vent} * \frac{P_{DC}}{P_{server}} \quad (\text{Vergelijking 4.1})$$

Hierbij is  $P_{lok-vent}$  het lokale ventilatorvermogen (28,8W),  $P_{DC}$  het opgenomen vermogen van het datacenter, bepaald in Bijlage 2 (25,3kW) en  $P_{server}$  het opgenomen AC-vermogen van een server, bepaald in Bijlage 2 (391W)

- **Datacenter-ventilatorvermogen**

Het door Better.be verbruikte ventilatorvermogen wordt geschat aan de hand van de prestaties van een vergelijkbare ventilator. Voor deze schatting worden de gegevens van de ECBlue FN050-ZI\_.DC.\_7P2 van Ziehl Abegg (Ziehl Abegg, 2012) gebruikt. Deze ventilator heeft een vergelijkbaar werkgebied (druk en debiet) en diameter als de ventilatoren van Better.be, maar zal waarschijnlijk zuiniger zijn dan de ventilatoren die bij Better.be geplaatst zijn, aangezien de ECBlue speciaal ontwikkeld is voor efficiëntie in een datacenter-omgeving.

Bij het bepalen van het benodigde ventilatorvermogen worden de in Tabel 4.5 weergegeven waarden voor debiet en drukval gebruikt. Deze waarden zijn bepaald volgens de methoden in Bijlage 2. Doordat Better.be gebruik maakt van twee in serie geplaatste ventilatoren wordt de totale drukval per ventilator gehalveerd.

Oplossing	Debiet (m <sup>3</sup> /h)	Drukval Koeling (Pa)	Drukval Filters (Pa)	Totale Drukval (Pa)
Huidige Situatie	5856	67	79	147
Nieuwe Rackontwerp	5856	0	25	25

Table 4.3: Drukval over de componenten van het huidige datacenter en het nieuwe rackontwerp.

Het benodigde ventilatorvermogen wordt bepaald door uit de fan-curve van de ECBlue FN050 (zie Afbeelding 4.2) te herleiden wat het benodigde vermogen van deze ECBlue FN050 zou zijn bij het benodigde debiet (5856 m<sup>3</sup>/h) en drukval (147/2 = 73,5 Pa). Dit levert een totaal benodigd datacenter-ventilatorvermogen op van ongeveer  $2 * 400 = 800W$ .

Om een vergelijkbaar stroomverbruik, en dus benodigde koeling, te behalen door middel van het ontwikkelde rack zijn 4 volledig gevulde racks nodig. Samen hebben deze een stroomverbruik van  $4 * 6 = 24kW$ . Voor deze vergelijking worden de racks uitgerust met een tweetal parallel geplaatste ECBlue FN025-ventilatoren, waarvan in Afbeelding 4.3 de karakteristieke fan-curve is afgebeeld. Dit levert per rack-ventilator een benodigd debiet op van  $(5856/4)/2 = 558 \text{ m}^3/\text{h}$  bij een drukval van 25 Pa. Dit levert per rack een benodigd ventilatorvermogen op van  $2 * 28 = 56W$ . Het totale datacenter-ventilatorvermogen is de som van het rack-ventilatorvermogen:  $4 * 56 = 224W$

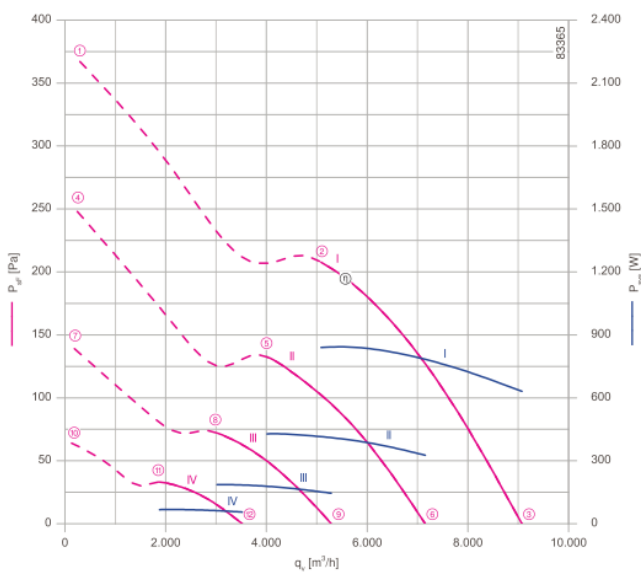


Illustration 4.24.2: Karakteristieke curve van een Ziehl Abegg ECBlue FN050-ventilator. Hier is voor 4 verschillende werkbereiken het debiet, vermogen en de drukval weergegeven.

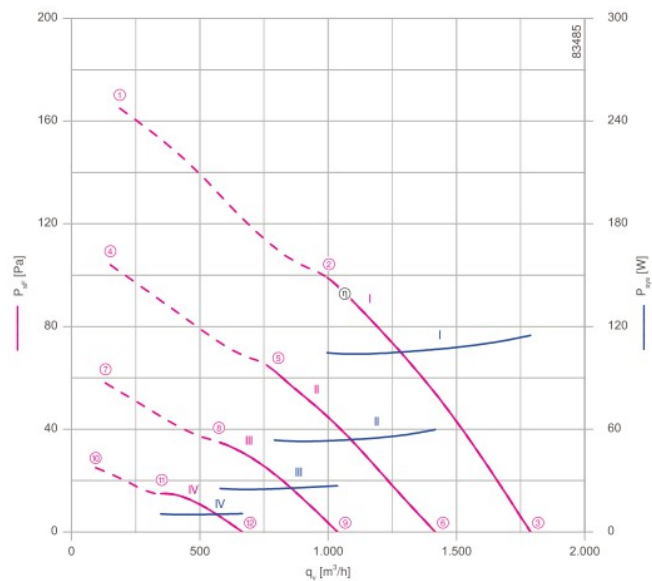


Illustration 4.34.1: Karakteristieke curve van een Ziehl Abegg ECBlue FN025-ventilator. Hier is voor 4 verschillende werkbereiken het debiet, vermogen en de drukval weergegeven.



## **Conclusie**

Door gebruik te maken van de nieuw ontwikkelde racks kan veel bespaard worden op de het stroomverbruik van de koeling. Het ventilatorvermogen dat benodigd is voor de koeling van het datacenter is bij gebruik van de nieuwe racks 224W, tegenover 800W; ruim 3,5x minder is dan het huidige verbruik.

De besparing op ventilatorvermogen wordt pas echt duidelijk wanneer ook het lokale ventilatorvermogen bekeken wordt. In de huidige situatie wordt bij een totaal datacenter-verbruik van 25,3kW 4716W verbruikt door de lokale ventilatoren. Doordat deze ventilatoren volledig overbodig zijn in het nieuwe rack-ontwerp wordt hiermee 18% bespaard op het energieverbruik.

## **Lopende kosten Stroomvoorziening**

Op basis van de in hoofdstuk 2 berekende efficiëntie is een inschatting gemaakt van de jaarlijkse kostenbesparing die mogelijk gemaakt worden door het gebruik van de 12V-LFP-oplossing. Bij deze kostenberekening worden de volgende aannames gedaan:

- De apparatuur verbruikt onder full load even veel stroom als idle, en draait 24 uur per dag, 365 dagen per jaar.
- Het energieverbruik wordt geschat op basis 6 racks welke met 5500W belast worden. Dit is gedaan omdat de energieprijzen voor grootverbruik lager zijn dan voor kleinverbruik.
- De energiekosten worden bepaald aan de hand van prijsschattingen van de zakelijke energieleverancier Sepa via [energievergelijken.nl](http://energievergelijken.nl). Hiervoor is het prijsniveau van juli 2014 gebruikt.
- De energiekosten zijn inclusief belasting, heffingskorting en netwerkkosten.
- Er wordt aangenomen dat beide oplossingen een vergelijkbare power-factor hebben.

	<b>Huidige Better.be-oplossing</b>	<b>12V-LFP</b>
<b>Efficiëntie (%)</b>	79,9	91,8
<b>Verbruik per rack (W)</b>	6884	5991
<b>Verbruik per 6 racks (W)</b>	41302	35947
<b>Benodigd ventilatorvermogen (W)</b>	$800 * \frac{6}{4} = 1200$	$224 * \frac{6}{4} = 336$
<b>Stroomverbruik per jaar (kWh) Per 6 racks</b>	372.317	317.839
<b>Stroomkosten per jaar Per 6 racks</b>	€38.094,-	€33.154,-
<b>Kostenbesparing per jaar Per 6 racks</b>		€4940
<b>Kostenbesparing per jaar Per rack</b>		€823

*Tabel 4.4: Samenvatting van de kostenbesparingen die bereikt kunnen worden door het gebruik van het nieuw te ontwikkelen rack.*

## **Conclusie**

Uit de voorgaande vergelijking is gebleken dat het ontwikkelde rack een significante verbetering is ten opzichten van huidige oplossingen voor datacenter-racks. Op de aanschafprijs van het rack is 44% te besparen vergeleken met een reguliere oplossing. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de kosten voor de UPS en het chassis. Bovendien is het onpraktisch om één enkel rack volgens de reguliere oplossing aan te schaffen: door de krachtige UPS is meteen een grote investering vereist. Het nieuw ontwikkelde rack is daarentegen erg schaalbaar, en kan probleemloos uitgebreid worden.

Daarbij kan op de koeling van het rack bespaard worden. De stroomsnelheid door het chassis en de hierdoor veroorzaakte drukval is significant lager dan bij reguliere oplossingen. Daardoor is 3,5x minder ventilatorvermogen benodigd.

Bij gebruik van het nieuwe rack kan veel bespaard worden op de energiekosten. De efficiëntie van het ontwikkelde rack is 11,9% hoger dan de huidige oplossing, en het benodigde datacenter-ventilatorvermogen is significant lager, wat jaarlijks een besparing van €823 per rack op kan leveren.

## Referentielijst

- American Power Conversion. (2013). *APC Price List*.
- ANJCELL Technology Co Ltd. (2012a). ANJCELL E-Series Battery User's Guide, (A0), 1–20.
- ANJCELL Technology Co Ltd. (2012b). Battery Management System (BMS ), (A0), 2.
- ASHRAE Technical Committee. (2011). 2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance, 1–45.
- ASTM. (2012). Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces. Retrieved from <http://www.astm.org/Standards/D610.htm>
- ASTM. (2014). Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems. Retrieved from <http://www.astm.org/Standards/D4169.htm>
- Boudreau, H. S. (2009). *Designing, Constructing, And Testing A Low-speed Open Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel*. University of Florida.
- Cengel, Y. A. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach* (pp. 757–789).
- Coggan, A. R. (2011). *The Coggan Low Speed Wind Tunnel : Design, Dimensions and Operating Characteristics*.
- Emerson Network Power, & Szpek, M. (2013). 400V DC in Data Center and Telecom Center. In *Data Center Conference*. Moskou.
- Engineering Toolbox. (n.d.). *Fan Affinity Laws*. Retrieved August 04, 2014, from [http://www.engineeringtoolbox.com/fan-affinity-laws-d\\_196.html](http://www.engineeringtoolbox.com/fan-affinity-laws-d_196.html)
- Europees Parlement. (2011). Richtlijn 2011/65/EU van het Europees Parlement en de Raad van 8 juni 2011 betreffende beperking van het gebruik van bepaalde gevaarlijke stoffen in elektrische en elektronische apparatuur. Retrieved from [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2011.174.01.0088.01.NLD](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2011.174.01.0088.01.NLD)
- Fluke Corporation. (2005). Fluke 330 Series Clamp Meters.
- Fujitsu Microelectronics Ltd. (2008). RAM's Power Consumption Comparison, 2–3.
- Gamatronic Electronic Industries Ltd. (2008). *Power+ Modular UPS System User Guide*.
- GE Critical Power. (2013). *End-to-End Embedded Power - Product Selection Guide*.
- Geary, D. E., Electric, U., Starline, C., & Solutions, D. C. (2013). 380V DC Eco-system Development Present Status and Future Challenges Reported 380VDC Distribution Advantages, (October).
- Glanz, J. (2012, September 22). Power, Pollution and the Internet. *The New York Times*. Retrieved from <http://www.nytimes.com/2012/09/23/technology/data-centers-waste-vast-amounts-of-energy-belying-industry-image.html?pagewanted=all&r=0>

- Groth, J., & Johansson, A. V. (1988). Turbulence reduction by screens. *Journal of Fluid Mechanics*, 197, 139. doi:10.1017/S0022112088003209
- Intel. (2004). *ATX Specification* (No. 2.2).
- Intel Corporation. (2007). Quad-Core Intel® Xeon® Processor 5300 Series - Thermal/Mechanical Guidelines, (April).
- Kelley, C., Singh, H., Smith, V., & The Green Grid Technical Committee. (2012). *Data Center Efficiency and IT Equipment Reliability at Wider Operating Temperature and Humidity Ranges*.
- Kennedy, D. (2012). *Ramification of Server Airflow Leakage in Data Centers with Aisle Containment*.
- Lee, S. (1995). Optimum Design and Selection of Heat Sinks. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologie*, 18(4).
- Lm\_sensors. (2014). *lm-sensors*. Retrieved August 15, 2014, from <http://www.lm-sensors.org/>
- Loh, C. K., & Chou, D. J. (2004). Comparative Analysis of Heat Sink Pressure Drop Using Different Methodologies, 85210(1), 4–9. doi:10.1109/STHERM.2004.1291317
- Mashud, M. (2012). Design Construction and Performance Test of a Low Cost Subsonic Wind Tunnel, 2(10), 83–92.
- Mehta, R. D., & Bradshaw, P. (1979). Design rules for small low speed wind tunnels. *Aero. Journal (Royal Aeronautical Society)*, (.).
- Methode Electronics. (2012). *OCP Connector*.
- Moss, D., & Beam, J. H. (2009). *Energy Impact of Increased Server Inlet Temperature*.
- Munson, B. R., Jones, D. F., & Okiishi, T. H. (2005). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (5th ed.). Wiley.
- NEBS. (1995). GR-63-CORE: NEBSTM Requirements: Physical Protection.
- NTC Network AS. (2013). Gamatronic's Pricelist.
- Octopart.com. (2014). *Datasheets, Electronic Parts, Components, Search - Octopart*. Retrieved August 15, 2014, from <http://octopart.com/>
- Oswal, M., Paul, J., & Zhao, R. (2010). *A comparative study of Lithium-Ion Batteries* (p. 31).
- Patankar, S. V. (2010). Airflow and Cooling in a Data Center. *Journal of Heat Transfer*, 132(7), 073001. doi:10.1115/1.4000703
- Penn Elcom Direct GmbH. (2014). *Insteekhoekprofiel 9.5mm | Profielen Casemaker profielen flightcase onderdelen | Penn Elcom Direct GmbH*. Retrieved August 15, 2014, from <http://www.flightcase-onderdelen.nl/flightcase-onderdelen/casemaker-profielen/insteekhoekprofiel-9-5mm/46/1763>

- Perez, R. (1993). Lead-Acid Battery State of Charge vs. Voltage. *Home Power*, (September), 66–70.
- PuTTY Team. (2014). *PuTTY - a free SSH and telnet client for Windows*. Retrieved August 14, 2014, from <http://www.putty.org/>
- Rasmussen, N. (2007). AC vs . DC Power Distribution for Data Centers. *APC Media*.
- Rasmussen, N., & Spitaels, J. (2007). A Quantitative Comparison of High Efficiency AC vs DC Power Distribution for Data Centers. *APC Media*.
- RS-Online. (2014). *Bosch Rexroth*. Retrieved August 15, 2014, from [http://nl.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=Automation2011&file=products\\_2&cm\\_sp=PCA-\\_-Automation2011-\\_-bosch\\_rexroth](http://nl.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=Automation2011&file=products_2&cm_sp=PCA-_-Automation2011-_-bosch_rexroth)
- Sargison, J. E., Walker, G. J., & Rossi, R. (2004). Design and calibration of a wind tunnel with a two dimensional contraction. In *15th Australasian Fluid Mechanics Conference* (p. 4).
- SC825 Air Shroud User ' s Guide. (n.d.).
- Sheet, D. (2013). Data Sheet CAR2512FP Front-End CAR2512FP series rectifier, 1–15.
- Simmons, R. E. (1997). *A simple method to estimate heat sink air flow bypass*. Retrieved May 12, 2014, from <http://www.electronics-cooling.com/1997/05/a-simple-method-to-estimate-heat-sink-air-flow-bypass/>
- Simons, R. E. (2003). *Estimating Parallel Plate-Fin Heat Sink Thermal Resistance*. Retrieved May 12, 2014, from <http://www.electronics-cooling.com/2003/02/estimating-parallel-plate-fin-heat-sink-thermal-resistance/>
- SSI. (2008). Power Supply Design Guideline for 2008 Dual-Socket Servers and Workstations, (1.2.1).
- Storm Copper Components. (2012). *Copper Busbar Ampacity Tables*. Retrieved July 30, 2014, from <http://www.stormcopper.com/design/ampacity.htm>
- Striebel, K., Shim, J., Srinivasan, V., & Newman, J. (2005). Comparison of LiFePO<sub>4</sub> from Different Sources. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(4), A664. doi:10.1149/1.1862477
- Super Micro Riser Cards*. (n.d.). Retrieved July 18, 2014, from <http://www.supermicro.com/ResourceApps/Riser.aspx>
- SuperMicro Computer Inc. (2007). *X7DBR-8+ & X7DBR-i+ User's Manual*.
- SuperMicro Computer Inc. (2014). *Thermal Components Matrix: Heat Sinks,Fans,Cooling*. Retrieved August 02, 2014, from <http://www.supermicro.nl/support/resources/Thermal/>
- Tate Inc. (2014). Tate Access Floors FAQ.
- The Green Grid. (2008). Qualitative Analysis of Power Distribution Configurations For Data Centers, (December), 1–35.

- TIA. (2005). ANSI/TIA-942: Telecommunications Infrastructure Standards for Data Centers, (April).
- Uptime Institute. (2013). Data center industry survey.
- VanGilder, J. W., & Schmidt, R. R. (2005). Airflow Uniformity Through Perforated Tiles in a Raised- Floor Data Center. In *ASME InterPACK '05*. APC Media.
- Wang, J., Ping, L., Hicks-Garner, J., & Sherman, E. (2011). Cycle-life model for graphite-LeFePO<sub>4</sub> cells. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.134
- Welsh, A. (2013). Low Turbulence Wind Tunnel Design and Wind Turbine Wake Characterization.
- Wu, B., Ren, Y., & Li, N. (2011). *Electric Vehicles – The Benefits and Barriers*. (S. Soylu, Ed.) (p. 252). InTech. doi:10.5772/717
- Zhang, Y., Wang, C.-Y., & Tang, X. (2011). Cycling degradation of an automotive LiFePO<sub>4</sub> lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 196(3), 1513–1520. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.08.070
- Ziehl Abegg. (2012). Axial fans Main Catalogue.

## Bijlagen

- **Bijlage 1: Programma van Eisen**
- **Bijlage 2: Meetmethoden voor stroomverbruik en efficiëntie**
- **Bijlage 3: Efficiëntie van componenten**
- *Bijlage 4: Stroomvoorziening: 12Vdc-LFP (Confidentiëel)*
- **Bijlage 5: Koeling: Achtergrond en doelstellingen**
- **Bijlage 6: Experimentele verificatie van het theoretische model**
- **Bijlage 7: Meetplan voor het experimenteel verifiëren van het model**
- **Bijlage 8: Stap voor stap uitwerken van correcties van het model**
- *Bijlage 9: Verwachtingen ten aanzien van het koelgedrag (Confidentiëel)*
- *Bijlage 10: Plaatsing van servers in een rack (Confidentiëel)*
- *Bijlage 11: Tekeningen Ontwerp (Confidentiëel)*

# Bijlage 1: Programma van Eisen

Op basis van de hierboven gedefinieerde doelstelling en omgevingsanalyse is een Programma van Eisen (PvE) opgesteld. Dit PvE bevat alle eisen waaraan het te ontwikkelen rack zal moeten voldoen om een volwaardige onderdeel te kunnen zijn in het nieuwe datacenter van Better.be.

## Eisen

### 1. Regelgeving

Het rack en de geplaatste apparatuur dienen te voldoen aan de volgende normen:

1. NEN-EN-IEC 60950-1:2006 (Apparatuur voor informatietechniek – Veiligheid)
2. NEN-EN-IEC 61000 (Elektromagnetische Compatibiliteit)
3. RoHS 2011/65/EG (Beperking van gevaarlijke stoffen) (Europees Parlement, 2011)
4. GR-63-CORE; Seismic Zone 1 (Bestendigheid tegen dynamische belasting)<sup>1</sup> (NEBS, 1995)

### 2. Stroomvoorziening

1. Het rack dient aangesloten te worden door middel van 230Vac, 32A CEE-verbindingen.
2. Het rack dient een maximaal opgenomen vermogen van (na 20% correctie) 6 kW te hebben.<sup>2</sup>
3. Het rack moet de geplaatste servers in staat stellen om na onderbreking van de netspanning minimaal 5 minuten te kunnen functioneren.<sup>3</sup>
1. De stroomvoorziening aan de apparatuur dient tijdens normaal gebruik en binnen de in 2.2 genoemde periode te voldoen aan de in 1.2 genoemde criteria.
4. De stroomvoorziening dient na herstel van netspanning automatisch van accuspanning terug te schakelen op netspanning.
5. Het in 2.4 genoemde overschakelen dient te gebeuren binnen 1 en 30 seconden.
6. Het in 2.5 genoemde schakeltijdstip dient per rack differentieerbaar te zijn, om zo de belasting van de generator gradueel op te voeren.
7. De efficiëntie van de stroomvoorziening dient bij 100% belasting van muur tot moederbord minimaal 90% te zijn.

---

1 Het is zeer onwaarschijnlijk dat het datacenter in Enschede ooit door een aardbeving getroffen zal worden. De GR-63-CORE is echter een goede datacenter-specifieke richtlijn voor de bestendigheid tegen dynamische belasting.

2 De ingaande lijnen zijn theoretisch belastbaar tot 32A oftewel 7200W. In de praktijk veroorzaakt dit echter een verhoogde slijtage van zekeringen. Bovendien is de apparatuur geen ideale stroomafnemer en zal onregelmatigheden veroorzaken waardoor de daadwerkelijke belasting hoger ligt.

3 Onder normale omstandigheden is een generator binnen 30 seconden gebruiksklaar. Het kan echter voorkomen dat het starten van de generator faalt, waarna met enige tussentijd nieuwe startpogingen gedaan worden. Na 5 minuten kan de generator als defect beschouwd worden.



8. De aan de moederborden geleverde spanning dient ten alle tijde te voldoen aan de ATX-2.2-specificaties(Intel, 2004) en de *SSI Power Supply Guideline for 2008 Dual-Socket Servers and Workstations*(SSI, 2008). De voltages op de afzonderlijke voedingslijnen dienen dienen binnen de onderstaande toleranties te vallen:

Voltage	Tolerantie	Minimum (V)	Maximum (V)
+12Vdc	±5%	11,4	12,6
-12Vdc	±10%	-10,8	-13,2
+5Vdc	±5%	4,75	5,25
-5Vdc	±10%	-4,5	-5,5
+5Vdc Standby	±5%	4,75	5,25
+3,3Vdc	±5%	4,75	5,25

*Tabel 1: Voltages en hun toleranties van de verschillende voedingslijnen van een PSU volgens de ATX-2.2-specificaties*

9. Het rack dient voorzieningen te bieden voor het aarden van het rack en de geplaatste apparatuur.
2. Het rack dient een elektrisch geleidend en tegen corrosie beschermd pad te bieden van de apparatuur naar de in 2.8 genoemde aardepunten.
10. Alle aarde-punten dient in staat te zijn voor een roest-test volgens “ASTM D610-08; Grade 6; 48 uur zoutspray volgens ASTM B117-07” te kunnen slagen.[3]24 2

### 3. Koeling

1. De temperatuur van apparatuur dient ten allen tijde binnen de door de fabrikant gespecificeerde grenzen gehouden te worden. Deze grenzen zullen in hoofdstuk 3 verder toegelicht worden.
2. Het temperatuurverschil tussen de in- en uitlaatemperatuur van de luchtstroom door het rack dient maximaal 12,5°C te bedragen.
3. De servers moeten binnen deze temperatuurgrenzen blijven zolang de ingaande luchtstroom aan de ASHRAE Allowed Class 2-criteria voldoet. (ASHRAE Technical Committee, 2011)

ASHRAE Klasse	Temperatuurbereik	Maximaal dauwpunt
A2 Allowed	10 - 35°C	21°C

4. Er dient geen gebruik gemaakt te worden van lokale ventilatie.
3. De ingaande luchtstroom dient middels een filter van filterklasse G4 met minimaal 85%

initiele effectiviteit geconditioneerd te worden.<sup>4</sup>

#### **4. Constructie**

1. Het rack dient zonder aanpassingen bruikbaar te zijn in een datacenter voorzien van standaard verhoogde vloeren met een tegelgrootte van 600x600mm.
2. Het rack dient plaats te bieden aan minimaal 12 2U servers.
3. Het rack dient apparatuur van verschillende hoogtes te kunnen huisvesten.
4. Het rack dient bij volledige vulling te kunnen voldoen aan eis 1.4. Hiervoor mogen meerdere racks onderling verbonden worden.
4. Het rack dient ter plaatse van de bevestigingspunten voor apparatuur een statische belasting van 25kg per U te kunnen dragen.
5. Bij de bouw van het rack dient, met uitzondering van de stroomvoorziening en serverbevestiging, gebruik gemaakt te worden van in de handel verkrijgbare onderdelen.
6. Een gevuld rack dient in het ventilatiepad een 30% lagere stromingsweerstand te hebben dan reguliere oplossingen.
7. Het rack dient onder normaal gebruik een verwachte levensduur van 10 jaar te hebben bij omgevingsomstandigheden binnen ASHRAE Allowed Class A2 (ASHRAE Technical Committee, 2011)
8. De kostprijs van een rack zonder dient minimaal 25% lager zijn dan bestaande oplossingen met vergelijkbare capaciteit.

#### **5. Apparatuur**

1. Het rack dient geschikt te zijn voor SuperMicro-servers met Enhanced Extended ATX-form-factor.
2. De bevestiging van apparatuur dient een gewicht van 70kg te kunnen dragen bij een belasting volgens eis 1.4.
5. Het rack dient plaats te bieden voor alle benodigde ondersteunende apparatuur (stroomvoorziening, netwerkswitches etc.) en minstens 2U vrije ruimte te bieden voor toekomstige uitbreiding.
6. Het rack dient voldoende netwerkapparatuur te bevatten om per server 2 redundante GbE-poorten en 1 out-of-band management-poort aan te kunnen sluiten. Deze aansluitmogelijkheden dienen over minimaal 2 afzonderlijke netwerkswitches verdeeld te zijn.
3. Het rack dient ten alle tijde voldoende stroomcapaciteit te hebben voor alle ondersteunende apparatuur.

---

<sup>4</sup> Dit instromende luchtstroom wordt gefilterd om vervuiling die de apparatuur aan zou kunnen tasten te verwijderen. Bovendien veroorzaakt een filter een gelijkmatige luchtstroom door het rack, en het datacenter.

4. Het rack dient ruimte te bieden voor de plaatsing van minimaal één 2,5-inch SSD per server.

## 6. Bekabeling

1. Er dienen paden aanwezig te zijn voor de bekabeling van de hoofdstroomvoorziening.
2. Er dienen paden aanwezig te zijn voor de bekabeling van de voedingen van de afzonderlijke servers.
3. Er dienen paden aanwezig te zijn voor de plaatsing van 3 CAT6-kabels van afzonderlijke servers naar de switches.
4. Kabels dienen zodanig bevestigd te kunnen worden zodat deze niet beschadigd kunnen raken tijdens het installeren en verwijderen van apparatuur.
5. De paden voor de bekabeling mogen bij normaal gebruik geen beschadigingen aan de bekabeling veroorzaken middels snijden, trekken of buiging.
6. Het rack dient de mogelijkheid te bieden om losse kabels middels tie-wraps of klittenband vast te binden.

## 7. Verplaatsing

1. Het rack dient bij volledige vulling te voldoen aan “ASTM D4169-09 Assurance Level II, DC2; D6055 criteria voor Push-Pull-vervoer”.(ASTM, 2014)
2. Het rack dient door één persoon over een vlakke vloer vervoerd te kunnen worden.
3. Het rack dient bij volledige vulling in staat te zijn een 25mm brede spleet in de vloer te passeren.
4. Het rack dient door een deuropening van 9000x2130mm verplaatst te kunnen worden. (TIA, 2005)
5. Het rack dient verplaatst te kunnen worden door een gang van 1200mm breed met een haakse bocht.
6. Elk wiel moet in staat zijn om (onafhankelijk of als paar) te kunnen rollen over een drempel van 6mm hoog met een snelheid van 0,2 m/s bij een volledig gevuld rack.
7. Gebruik
7. Het rack dient door één persoon van apparatuur voorzien te kunnen worden.
8. Het rack mag bij normaal gebruik geen gevaar vormen voor de gebruiker.
9. De gebruiker mag bij normaal gebruik geen gevaar vormen voor de apparatuur.
10. Het rack dient de geplaatste apparatuur afdoende te beschermen tegen fysieke schade.
8. Afzonderlijke servers dienen (exclusief plaatsen van CPU, geheugen en koelblokken) binnen 15 minuten gereed te maken zijn voor plaatsing.

11. Afzonderlijke voorbereide servers dienen binnen 5 minuten te verwijderen en plaatsen zijn.
12. Defecte ondersteunende apparatuur zoals netwerkswitches of klimaat-monitoring dient binnen 30 minuten vervangen te kunnen worden.

## **Wensen**

1. De efficiëntie van de stroomvoorziening dient bij 100% belasting van muur tot moederbord minimaal 95% te zijn.
2. Het rack dient plaats te bieden aan 20 servers.
3. Het rack dient geschikt te zijn voor ongemodificeerde hardware.
4. Er dienen paden aanwezig te zijn voor de plaatsing van 4 CAT6-kabels van afzonderlijke servers naar de switches.
5. Het rack dient de mogelijkheid te hebben om via het netwerk informatie aan te kunnen bieden over de status van de bevattende apparatuur, zoals voltage-niveaus, temperaturen en stroomverbruik.
6. Het rack dient voorzieningen te hebben om meerdere racks te kunnen koppelen.
7. Afzonderlijke servers dienen (exclusief plaatsen van CPU, geheugen en koelblokken) binnen 5 minuten gereed te maken zijn voor plaatsing.
8. Afzonderlijke voorbereide servers dienen binnen 2 minuten te verwijderen en plaatsen zijn.
9. Defecte rack-apparatuur dient binnen 15 minuten te vervangen zijn.

## Bijlage 2: Meetmethoden voor stroomverbruik en efficiëntie

Voor het bepalen van het stroomverbruik en efficiëntie van de voor de modelvorming gebruikte server en UPS zijn de onderstaande methoden gebruikt.

### Meetapparatuur

Bij het bepalen van het stroomverbruik en efficiëntie van apparatuur is gebruik gemaakt van een Fluke 336 Clamp Meter. Dit instrument beschikt over de volgende relevante eigenschappen:

Gemeten waarde	Meetbereik	Nauwkeurigheid
AC Stroom	0-600A	2%±5 stappen
DC Stroom	0-600A	2%±3 stappen

Tabel 1: Specificaties van Fluke 336 Clamp Meter bij 23°C, 0-90% luchtvochtigheid (Fluke Corporation, 2005)

### Bepaling van het verbruik en de efficiëntie van een server

Het verbruik van een server en de efficiëntie van de voeding is als volgt getest:

- Bij het uitvoeren van deze metingen is gebruik gemaakt van de opstelling in Bijlage 5. Hierbij is een server voorzien 2U heatsinks in een windtunnel geplaatst.
- De server is aangezet, waarna deze door middel van het linux-commando **stress --cpu 8 --vm 4** met full load belast wordt.
- Door middel van de Fluke 336 Clamp Meter is de stroom (A) door elk van de DC-kabels 230Vac voedingskabels gemeten. Hierbij wordt uitgegaan van een power-factor van 1. Zie Tabel 1 voor de meetresultaten.
- Deze stroom is vermenigvuldigd met de spanning (V) over deze voedingskabels om het vermogen (P) te verkrijgen.
- Het totale vermogen van de server is de som van de vermogens door de afzonderlijke voedingskabels.
- De efficiëntie van de voeding is bepaald via  $Eff = P_{DC}/P_{AC} * 100\%$ .

Spanning (V)	Stroom door voedingskabel (A)								Totale stroom (A)	Vermogen (W)
	1	2	3	4	5	6	7	8		
3,3Vdc	0.9	0.9	0.9						2.7	8.9
5Vdc	0.2	0.6	0.9	0.9	0.9				3.5	17.5
12Vdc	2.3	2.9	3.1	3.4	3.8	4	5.4		24.9	299
-5Vdc	0									0
-12Vdc	0									0
Totaal DC										<b>325.2</b>
Totaal 230Vac	1.7									<b>391</b>
Belasting										<b>56%</b>
Efficiëntie										<b>83%</b>

Tabel 2: Stroomverbruik en efficiëntie van een SuperMicro X7DBU-8+ met een enkele SuperMicro SP700-1R 700W PSU

## Discussie

Een SuperMicro SP700-1R 700W PSU heeft een efficiëntie van 83% bij een belasting van 56%. Dit is

## Bepalen van de belasting en efficiëntie van een UPS

Het verbruik en belasting van de UPS van Better.be is als volgt bepaald:

- Door middel van de Fluke 336 Clamp Meter is de stroom (A) door elk van de kabels van de ingang en uitgang gemeten. Hierbij wordt uitgegaan van een power-factor van 1. Zie Tabel 2 voor de meetresultaten.
- Deze stroom is vermenigvuldigd met de spanning (V) over deze voedingskabels om het vermogen (P) te verkrijgen.
- Het totale vermogen van de in- en output is de som van de afzonderlijke vermogens door de kabels.
- De efficiëntie van de UPS is bepaald via  $Eff = P_{OUT}/P_{IN} * 100$ .

	Voltage (V)	L1 stroom (A)	L2 stroom (A)	L3 stroom (A)	Vermogen (kVA)
Input	230	36.1	36.6	35.8	25,0
Output	230	35.6	33.8	34.0	23,8
Efficiëntie					<b>95.3%</b>

Tabel 3: Efficiëntie van Better.be's Gamatronic Power+ 50kVA UPS

## **Bepaling van het ventilatordebiet en het drukverschil in het datacenter van Better.be**

Om de koelprestaties van het ontwikkelde rack te kunnen vergelijken met het huidige datacenter van Better.be is een reeks metingen uitgevoerd in het datacenter. Bij deze metingen is het bepaald hoeveel lucht (debiet) Better.be gebruikt om zijn datacenter te koelen, en welke drukval dit veroorzaakt. Aan de hand van het gemeten debiet en de drukval is een vergelijking te maken tussen het ventilatorvermogen dat Better.be nodig heeft om zijn huidige datacenter te koelen, en wat het benodigde ventilatorvermogen voor een datacenter gevuld met de nieuwe racks zou zijn.

### **Meetmethoden**

Het debiet bij het datacenter van Better.be en de drukval over de verschillende onderdelen is bepaald volgens de onderstaande methoden. Deze metingen zijn genomen bij een buitentemperatuur van 17,0°C en relatieve luchtvochtigheid van 80%. Tijdens de metingen zijn deuren in het datacenter gesloten en stond de ventilator op stand 2 van 10. Het energieverbruik van het datacenter bedroeg tijdens het meten 25,3kW.

#### **1. Drukverschil over de koeling (Buitenlucht – Koeling)**

Deze drukval is gemeten tussen de buitenlucht en een opening in de uitgaande kant van de koeltoren. Er zijn in 30 seconden 10 metingen uitgevoerd, waarvan het gemiddelde berekend is.

#### **2. Drukverschil over het filterpakket (Koeling – Cold-zone)**

Deze drukval is gemeten tussen een punt op 10cm afstand van de ingaande kant van het filter en het midden van de cold-zone. Er zijn in 30 seconden 10 metingen uitgevoerd, waarvan het gemiddelde berekend is.

#### **3. Drukverschil over de racks (Cold-zone – Hot-zone)**

Deze drukval is gemeten tussen het midden van de cold-zone en de achterzijde van de racks. Er zijn in 30 seconden 10 metingen uitgevoerd, waarvan het gemiddelde berekend is.

### **Resultaten en conclusie**

<b>Meetpunt</b>	<b>Temperatuur (°C)</b>	<b>Relatieve Luchtvochtigheid (%)</b>
Buiten, voor de koeltoren	17,0	80%
Cold-zone, onder het filter-pakket	17,4	79,7%
Voor de luchtuitlaat	30	45,6%

*Table 4: Temperatuur en luchtvochtigheid op verschillende meetpunten in en rond het datacenter van Better.be.*

Meetpunt	Drukverschil
Buitenlucht – Koeling	67 Pa
Koeling – Cold-zone	79 Pa
Cold-zone – Hot-zone	1 Pa
Totaal Drukverschil	147 Pa

Table 5: Drukverschil over verschillende secties van het datacenter van Better.be.

In Tabel 4 en 5 zijn de meetresultaten binnen en rond het datacenter van Better.be vermeld. In deze meetresultaten valt allereerst op dat de temperatuur onder het filterpakket (dus vlak na de koeling) 0,4°C hoger is dan buitentemperatuur. Better.be koelt zijn datacenter door middel van waterverdamping (adiabatisch). Door de hoge luchtvochtigheid van de buitenlucht heeft nauwelijks tot geen waterverdamping plaats kunnen vinden, waardoor de temperatuur van de instromende lucht niet tot nauwelijks gedaald is. De buitentemperatuur is 5 minuten na de temperatuur onder het filterpakket gemeten. Door deze interval is het waarschijnlijk dat het temperatuurverschil wordt veroorzaakt door weersverandering.

In de meetresultaten van de buitentemperatuur is verder te zien dat het temperatuurverschil tussen de cold-zone en hot-zone ( $\Delta T$ ) 12,6°C bedraagt. Dit is bijna gelijk aan de door Better.be gewenste  $\Delta T$ .

Bij de resultaten van de drukmetingen valt op dat er nauwelijks drukverschil is tussen de hot-zone en cold-zone. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de lokale ventilatoren van de geplaatste servers. In de meeste gevallen is de draaisnelheid van deze ventilatoren afhankelijk van de temperatuur.

Het debiet dat benodigd is om 25,3kW warmte af te voeren door middel van lucht met een temperatuur van 17,4°C en een relatieve luchtvochtigheid (RH) van 79,7% is te berekenen volgens Vergelijking 1 en 2.

$$c_p = 1.005 + 1.85H \quad (\text{Vergelijking 1})$$

$$Q = \frac{H}{\rho c_p \Delta T} * 60 * 60 \quad (\text{Vergelijking 2})$$

Hierbij is  $c_p$  de warmtecapaciteit van de lucht (J/K),  $H$  de hoeveelheid waterdamp in deze lucht (kg/kg), welke bij lucht van 17,4°C en 80%RH 0.01 kg/kg bedraagt.  $Q$  is het debiet (m<sup>3</sup>/h),  $H$  de af te voeren warmte (W),  $\rho$  de dichtheid van de lucht (1.206 kg/m<sup>3</sup>) en  $\Delta T$  het temperatuurverschil van de lucht (°C) (12,6°C).

Voor het afvoeren van 25,3kW warmte onder deze condities is een debiet benodigd van 5856 m<sup>3</sup>/h.



### Bijlage 3: Efficiëntie van componenten

Voor het bepalen van de efficiëntie van verschillende oplossingen voor stroomvoorziening is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van informatie uit de literatuur. Er is zelf gezocht naar alternatieven wanneer de efficiëntie van een onderdeel niet beschikbaar is in de literatuur, of wanneer het sterk afwijkt qua te leveren vermogen. Uit deze alternatieven is voor de 48V en 24V-oplossing het meest efficiënte alternatief gekozen, en bij de 12V-LFP-oplossing de uiteindelijk gekozen *power-shelfs*.

	Onderdeel	Onderbouwing	Belasting
230Vac	UPS	Better.be maakt gebruik van een Gamatronic Power+ modulaire UPS(Gamatronic Electronic Industries Ltd., 2008). De efficiëntie van de UPS is bepaald volgens de methoden in Bijlage 2.	50%
	PSU	De geteste server beschikt over een SuperMicro SP700-1R 700W PSU, waarvan de efficiëntie is bepaald volgens de methoden in Bijlage 2.	56%
	Bekabeling	De efficiëntie van de bekabeling is overgenomen uit onderzoek van Schneider Electric(Rasmussen & Spitaels, 2007)	
230Vac Bypass	PSU, Bekabeling	Deze onderdelen zijn gelijk aan de 230Vac-oplossing	
	UPS	De UPS van Better.be beschikt over een geïntegreerde wisselschakelaar (STS) waarmee het mogelijk is de stroom om het accu-circuit te leiden. Better.be heeft hier in het verleden de efficiëntie van bepaald.	
400Vdc	AC/DC, UPS, PSU, Bekabeling	De efficiënties van de afzonderlijke componenten van de 400Vdc-oplossing zijn overgenomen uit onderzoek van Schneider Electric(Rasmussen & Spitaels, 2007).	
48Vdc	AC/DC	De door Rasmussen gebruikte AC/DC-converter is een grote Er wordt gebruik gemaakt van een Eltek FlatPack2 48V HE	50%
	UPS, PSU, Bekabeling	Deze efficiënties zijn overgenomen uit onderzoek van Rasmussen(Rasmussen & Spitaels, 2007)	
24Vdc	AC/DC	Er wordt gebruik gemaakt van een Eltek FlatPack2 24V HE.	50%
	PSU	Er wordt gebruik gemaakt van een Jasuny JDIX7500 DC ATX-voeding.	<i>Typical</i>
12V-LFP	AC/DC	Er wordt gebruik gemaakt van een CAR0812FP van GE Energy(Sheet, 2013)	85%

Tabel 1: Bron en onderbouwing

# Bijlage 5 Koeling - Achtergrond en doelstellingen

## **Inleiding**

Zoals uit hoofdstuk 3 is gebleken wordt door de geplaatste apparatuur zeer veel stroom verbruikt, wat voor het overgrote deel omgezet wordt in warmte. Er zal rekening gehouden moeten worden met een warmtestroom, H, van 6000W.

Uit het Programma van Eisen is op te maken dat deze warmtestroom afgevoerd zal moeten worden; de apparatuur zal dus gekoeld moeten worden. Voor deze koeling zijn de volgende eisen opgesteld:

### **1. Koeling**

1. De temperatuur van individuele server-onderdelen dient ten allen tijde binnen de door de fabrikant gespecificeerde grenzen gehouden te worden.
2. De temperatuur van de server-onderdelen moet binnen deze grenzen blijven zolang de ingaande luchtstroom aan de *ASHRAE Allowed Class 2*-criteria voldoet. [4]
3. Het temperatuurverschil tussen de in- en uitlaatemperatuur van de koeling dient maximaal 12,5°C te bedragen.
4. De servers dienen passief gekoeld te worden.
5. De temperatuur van ondersteunende apparatuur dient binnen het door de fabrikant aangegeven werkbereik te blijven.
6. De ingaande luchtstroom dient middels een grofmazig filter met maasgrootte van Xmm geconditioneerd te worden.

Hieruit blijkt dat strenge eisen gesteld worden aan de koeling van de apparatuur. In dit hoofdstuk zullen eerst de basisbeginselen van (datacenter)koeling behandeld worden. Aan de hand hiervan zullen de in het PvE gestelde eisen verder toegelicht worden, en zullen de doelstellingen voor het te ontwikkelen koelsysteem opgesteld worden.

Deze doelstellingen zullen in een later hoofdstuk de leidraad vormen tijdens de ontwikkeling van een adequate serverkoeling en manier om dit in het rack en het overkoepelende datacenter te integreren.

## **Grondbeginselen**

De conventionele oplossing voor het koelen van de apparatuur in een datacenter is door gebruik te maken van airconditioning en recirculatie van de luchtstroom. Hierbij wordt de datacentervloer gesplitst in drie delen:

- Cold-zone, of koude zone. In deze zone wordt het klimaat door de airconditioning binnen de door de beheerder gestelde grenzen gehouden.
- Apparatuur. Door middel van lokale ventilatoren wordt lucht uit de cold-zone over de te koelen componenten geblazen. Deze lucht warmt hierdoor op, en wordt vervolgens de hot-zone ingeblazen.
- Hot-zone, of warme zone. Een deel van de warme lucht wordt door een ventilator het gebouw uitgeblazen. De rest wordt door de airconditioning gekoeld en weer de cold-zone ingeblazen.

Deze manier van koelen is een direct gevolg van de normen die door de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) gesteld worden aan de omgevingscondities (ASHRAE Technical Committee, 2011). Deze normen, weergegeven in Tabel 1 zijn erop gericht om de betrouwbaarheid van apparatuur te kunnen garanderen. Om deze reden worden in het merendeel van de datacenters deze normen strikt opgevolgd.

Het blijkt echter dat deze eisen sterk achterhaald zijn (Kelley et al., 2012). Een hogere luchttemperatuur en -vochtigheid heeft geen merkbare invloed op de levensduur van servers, zo blijkt uit een uitgebreide test van Intel (Kelley et al., 2012). Ook specificeren hardware-fabrikanten in toenemende mate een hoger toelaatbaar temperatuurbereik voor hun apparatuur.

Better.be deed bijna een decennium geleden deze zelfde ontdekking en heeft een zeer efficiënte en kostenbesparende oplossing ontwikkeld voor het koelen van het serverpark, waarbij warmte afgevoerd wordt door middel van ventilatie met gefilterde buitenlucht.

Hierbij wordt slechts in de zomer door middel van waterverdamping (adiabatisch) gekoeld.

Better.be zet deze koeling reeds vele jaren succesvol in in zowel het eigen datacenter als dat van klanten.

In het nieuwe datacenter wil Better.be deze ontwikkeling een stap verder nemen. Het doel is namelijk om alle luchtkoeling achterwege te laten en de apparatuur slechts door middel van ventilatie met buitenlucht op temperatuur te houden. In het Nederlandse klimaat betekent dit dat de luchtkwaliteit binnen de ASHRAE 2011 Allowable A2-klasse zal vallen.

Door een hogere inlaattemperatuur zullen lokaal geplaatste ventilatoren harder moeten draaien, wat een hoger energieverbruik en meer slijtage met zich meebrengt.

Uit experimenten van APC en Dell blijkt dat een temperatuurstijging van 18°C (van 17°C tot 35°C) een toename in stroomverbruik van ongeveer 15% tot gevolg heeft (Moss & Beam, 2009), wat hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door de ventilatoren.

ASHRAE Versie	2004	2008	2011	2011 Allowable A2
<b>Minimale temperatuur</b>	20°C	18°C	18°C	10°C
<b>Maximale temperatuur</b>	25°C	27°C	27°C	35°C
<b>Minimale luchtvochtigheid</b>	40%			20%
<b>Maximale luchtvochtigheid</b>	55%	60%		80%
<b>Maximaal dauwpunt</b>				21°C

Tabel 1 ASHRAE-normen voor datacenter-klimaat

## Benodigd debiet en temperatuurverschil

Een van de meest gebruikte parameters voor het karakteriseren van de koeling van een datacenter is het debiet, de hoeveelheid lucht (in m<sup>3</sup>) die per uur benodigd is om de temperatuur van de te koelen apparatuur binnen de grenzen te houden. Meestal wordt hier gebruik gemaakt van m<sup>3</sup>/kW/h.

Hiernaast is het temperatuurverschil tussen de inlaat- en uitlaat van de apparatuur ( $\Delta T$ ) van belang. Deze is afhankelijk van het debiet  $Q$  en de af te voeren warmte  $H$  volgens:

$$H = \rho Q c_p \Delta T$$

Hierbij is  $\rho$  het soortelijk gewicht van lucht, en  $c_p$  de specifieke warmte (warmte-inhoud) van lucht.

Zoals hierboven te zien is heeft de  $\Delta T$  een grote invloed op de benodigde hoeveelheid koele lucht. In veel datacenters wordt gericht op een  $\Delta T$  van maximaal 10°C. Dit zorgt bij een ASHRAE 2011 Class A2-datacenter voor een maximale hot-zone-temperatuur van 37°C.

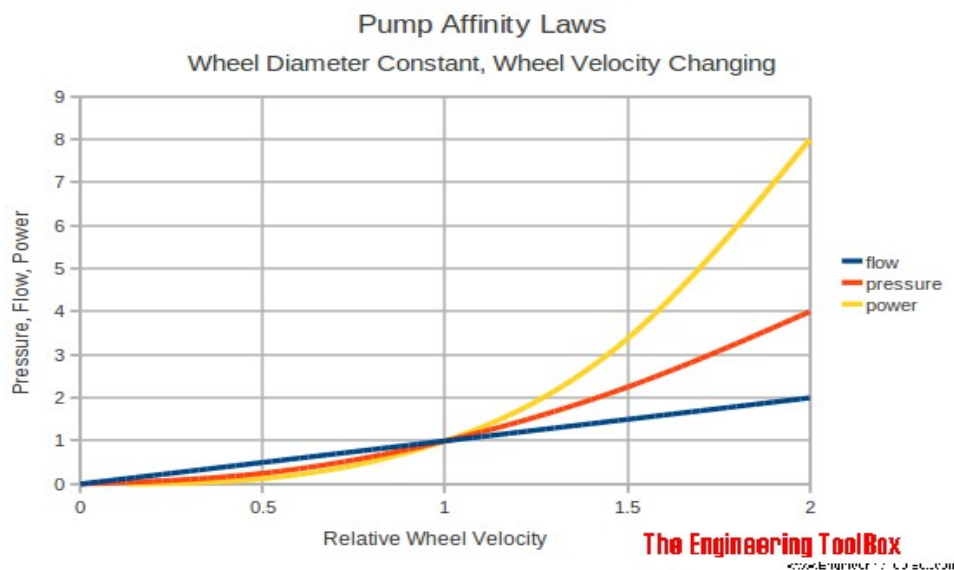
De bovengrens van de hot-zone temperatuur wordt hoofdzakelijk bepaald door het beperkte werkbereik van ondersteunende als PDU's en switches. Deze hebben meestal een maximale temperatuur van 45°C (Kelley et al., 2012) Deze waarde van 10°C is een afweging tussen benodigd koelvermogen en het werkklimaat in de hot-zone.

Better.be gaat er echter vanuit dat er slechts sporadisch mensen aanwezig zijn in de hot-zone en richt op een  $\Delta T$  van 12,5°C. Dit levert een benodigd debiet op van 250 m<sup>3</sup>/kW/h.

## Ventilatorvermogen en -efficiëntie

Een ander punt waar veel efficiëntiewinst te behalen valt is de manier van ventileren. Er zijn een aantal factoren die het ventilatorvermogen en de efficiëntie hiervan beïnvloeden. De belangrijkste hiervan is de relatie tussen de draaisnelheid van een ventilator, het opgewekte drukverschil en het geleverde debiet.

Zoals in onderstaande grafiek te zien is neemt bij toenemende draaisnelheid (RPM) het debiet lineair toe, het drukverschil ( $\Delta P$ ) met RPM<sup>2</sup> en het benodigde vermogen ( $P$ ) met RPM<sup>3</sup>. Het gevolg hiervan is dat dit benodigde vermogen zeer snel zal toenemen bij een toenemende draaisnelheid.



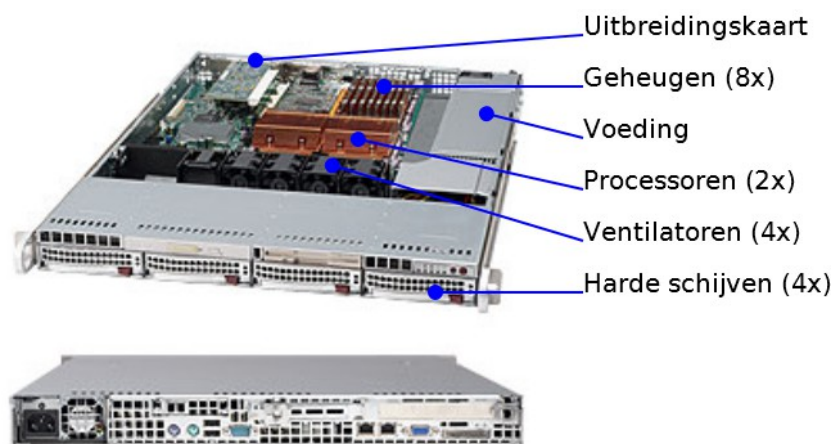
Afbeelding 1: Debiet, druk en vermogen vs draaisnelheid van een ventilator (Engineering Toolbox, n.d.)

De bovenstaande relatie is ook uit te herkennen in de vermogenswet voor een ideale ventilator:

$$P = Q * \Delta P * Eff$$

Omdat het benodigde debiet constant is bij een constante warmte-afvoer en  $\Delta T$ , is het benodigde ventilator-vermogen slechts op twee manieren te verminderen: Het verlagen van het drukverschil (ook wel statische druk of drukval genoemd) en het verhogen van de efficiëntie van de ventilatoren. De efficiëntie van een ventilator wordt hoofdzakelijk beïnvloed door de diameter hiervan. Zoals blijkt uit Afbeelding 1 neemt de efficiëntie van een ventilator sterk toe naarmate de diameter hiervan groter wordt.

De statische druk in het ventilatie-systeem is sterk afhankelijk van de afmetingen en constructie van de te koelen apparatuur. Bovendien veroorzaakt het meest toegepaste chassis type, het 1U-chassis (weergegeven in Afbeelding 2), vanuit de hoogste statische druk (Kennedy, 2012). Ook zijn er vanwege de kleine afmetingen ventilatoren met een relatief kleine diameter nodig.



Afbeelding 2: SuperMicro 1U Server

Bijkomend nadeel van dit type server is dat er vanwege het kleine frontale oppervlak een relatief hoge luchtsnelheid benodigd is om de gestelde eisen voor het debiet te kunnen halen. Ventilatoren die aan deze eisen kunnen voldoen hebben een speciale motor met een zeer hoog toerental, maar een erg laag startkoppel. Dit heeft als gevolg dat kleine verontreinigingen ervoor kunnen zorgen dat een ventilator niet start.

Bovendien valt in Afbeelding 2 op dat er relatief veel restricties in het stromingspad van de lucht geplaatst zijn.

## ***Doelstellingen chassis-ontwerp met betrekking tot de koeling***

Een van de doelen van het nieuwe rackontwerp is om het benodigde ventilatorvermogen te minimaliseren. De realisatie hiervan is op een drietal punten gefocust:

- Verhogen van de ventilator-efficiëntie
  - De grootste efficiëntiewinst is te behalen door de gemiddelde diameter van de ventilatoren in het rack te verhogen. De meest effectieve methode hiervoor is het verplaatsen van de ventilatoren op chassis-niveau naar rack-niveau.
- Verlaging van de luchtsnelheid door een aangepast ontwerp van het chassis
  - Door het frontale oppervlak van een chassis te vergroten en de koelblokken op de servers optimaal te dimensioneren is een grote winst te behalen in het benodigde ventilatorvermogen.
- Verlaging van de drukval over de server door het ontwerp van het chassis te optimaliseren.
  - Door onnodige restricties in het stromingspad van de lucht te verwijderen is waarschijnlijk een grote reductie in statische druk te realiseren.
- Autonomie van het rack.
  - Het passief koelen van de apparatuur in het rack stelt zeer hoge eisen aan de betrouwbaarheid van de ventilatie. Een korte onderbreking of vermindering van de luchttoevoer kan er al voor zorgen dat kritieke componenten te heet worden. Aangezien er in een datacenter zeer veel externe factoren invloed hebben op de effectiviteit van de ventilatie is het essentieel dat het rack in staat is in zijn eigen ventilatie te voorzien.

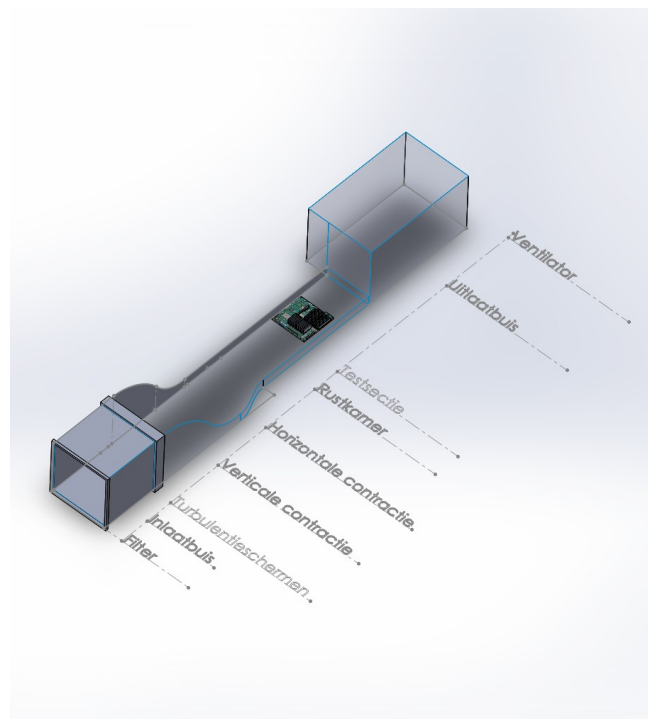
## Bijlage 6: Experimentele verificatie van het theoretische model

Om het opgestelde model te verifiëren is besloten een reeks experimenten uit te voeren. Bij het opstellen van dit model zijn namelijk veel aannames gedaan, die door middel van dit experiment getoets en eventueel aangepast kunnen worden. Hiertoe is een windtunnel gebouwd die in staat is de luchtstroom door een enkele server na te bootsen.

Deze windtunnel is gebouwd bij Better.be en is gebaseerd op een tweetal windtunnels van vergelijkbaar en verwachte stroomsnelheden (Coggan, 2011; Welsh, 2013).

Het belangrijkste uitgangspunt bij het ontwerp van de windtunnel is het creëren van een gelijkmatig mogelijke luchtstroom in een ruimte die vergelijkbaar is met een 2U-chassis. Dit is van belang om de aannames in het model zo dicht mogelijk te kunnen benaderen.

De windtunnel bestaat grofweg uit de volgende onderdelen, weergegeven in Afbeelding 1.



Afbeelding 1: Onderdelen van de gebouwde windtunnel

### 1. Filter en inlaatbuis

Deze onderdelen zijn de eerste fase in het verminderen van de turbulentie in de windtunnel. Door een uniforme drukval te bieden worden ongelijkmatigheden in de flow verminderd, aangezien de drukval over een filter of scherm in verhouding staat tot *luchtsnelheid*<sup>2</sup> (Mehta & Bradshaw, 1979).

De lengte van de inlaatbuis is dusdanig gekozen dat de door het filter veroorzaakte turbulentie uitgevlakt is op het moment dat de luchtstroom bij de volgende sectie aankomt (Groth & Johansson, 1988).

### 2. Turbulentieschermen

Deze schermen hebben een zelfde functie als het inlaatfilter.

Door het gebruik van zowel het filter als de turbulentieschermen is te verwachten dat grove en fijne turbulentie bij de ingang van de volgende sectie bijna volledig opgeheven is. (Groth & Johansson, 1988)

### 3. Contractie

Dit onderdeel, dat is opgebouwd uit twee delen om de constructie van de tunnel te vereenvoudigen, heeft het volgende effect op de luchtstroom (Mehta & Bradshaw, 1979):

- Het verhogen van de stroomsnelheid. Hierdoor kunnen de filters en turbulentieschermen in een gebied met een lagere luchtsnelheid geplaatst worden, wat resulteert in een lagere drukval en betere prestaties.
- Het verminderen van zowel grote als kleine snelheidsvariaties (ongelijkheid en turbulentie)

In hoeverre de gelijkmatigheid van de luchtstroom verbeterd wordt is sterk afhankelijk van de vorm van de contractie-sectie. De richtlijnen van Mehta et. a. zijn gebaseerd op een enkele driedimensionale contractie. Zodra echter gebruik gemaakt wordt van een dubbele tweedimensionale contractie is een andere vorm van de contractiesecties nodig. Deze is gebaseerd op experimenten van Sargison (Sargison, Walker, & Rossi, 2004). Een contractiesectie met deze vorm en afmetingen zorgt in het optimale geval voor een turbulentiereductie van 40%

Het laatste deel van de contractiesectie is opgebouwd uit beweegbaar glad karton om zo eenvoudig de afmetingen van de testsectie aan te kunnen passen aan de verschillende scenario's.

### 4. Afschuining hoeken

Als de doorsnede van de contractie-sectie niet cirkelvormig is, bestaat er een grote kans dat de boundary-layer (de luchtlaag langs de tunnelwanden, die een lagere stroomsnelheid heeft dan de rest van de lucht) zich scheidt en er turbulentie ontstaat. Deze effecten kunnen sterk verminderd worden door kleine 45°-afschuiningen in de hoeken te plaatsen (Mehta & Bradshaw, 1979). Hierbij dient zorg gedragen te worden dat deze afschuiningen zo vlak en regelmatig mogelijk zijn.

### 5. Rustkamer

Na de contractiesectie heeft de luchtstroom enige tijd nodig om een laminair stromingsprofiel te vormen. Als geen gebruik gemaakt zou worden van een contractie-sectie is bij een stroomsnelheid van 1 m/s een rustkamer met een lengte van 3 meter benodigd (Munson, Jones, & Okiishi, 2005). Door gebruik van de contractie-sectie is de stroming door de tunnel echter al na  $0,5 * \text{hydraulische\_diameter}$  uniform genoeg (Mehta & Bradshaw, 1979) (Mashud, 2012). Deze hoge uniformiteit wordt veroorzaakt door de geleidelijke drukval in de contractiesectie, en de geometrie van deze sectie, waardoor een sterke vermindering in separatie en variabiliteit van de stroom veroorzaakt wordt (Boudreau, 2009).



## 6. Testsectie

De daadwerkelijke metingen worden uitgevoerd in de testsectie. De basisafmetingen van deze sectie zijn gelijk aan de afmetingen van een 2U-19inch rack. Door de plaatsing van kartonnen schotten is de testsectie aan te passen aan de verschillende scenario's.

Doordat door middel van de turbulentie-schermen en de contractie-sectie een voorspelbare luchtstroom zonder grote verstoringen gecreëerd wordt, kan aangenomen worden dat de in de testsectie gemeten waarden losstaan van versturende omgevingsinvloeden.

## 7. Ventilator

Bij deze windtunnel wordt gebruik gemaakt van een aanzuigende ventilator. Hierdoor wordt voorkomen dat turbulenties en verstoringen door de ventilatorbladen de tunnel ingeblazen worden en invloed hebben op de stroming in de tunnel (Coggan, 2011). Er wordt gebruik gemaakt van een ECBlue fan van Ziehl Abeg met de volgende karakteristieken:

## Gedrag van de tunnel

### Turbulentie-karakteristieken

Een goede indicatie voor het turbulentiegedrag is het zogenaamde Reynolds-getal. Deze karakteristiek is een functie van de geometrie van een buis, de stroomsnelheid van het medium en de viscositeit en dichtheid hiervan (Munson et al., 2005), volgens 1:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

Hierbij is  $\rho$  de dichtheid van de lucht ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V$  de stroomsnelheid ( $\text{m/s}$ ),  $D_h$  de hydraulische diameter (equivalente diameter ten opzichte van een ronde buis (meter)) en  $\mu$  de dynamische viscositeit van lucht ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ).

De hydraulische diameter van een rechthoekige buis wordt bepaald via:

$$D_h = \frac{2(H * W)}{(H + W)} \quad (\text{Vergelijking 2})$$

Hier is  $D_h$  de hydraulische diameter,  $H$  de hoogte van de tunnel en  $W$  de breedte van de tunnel.

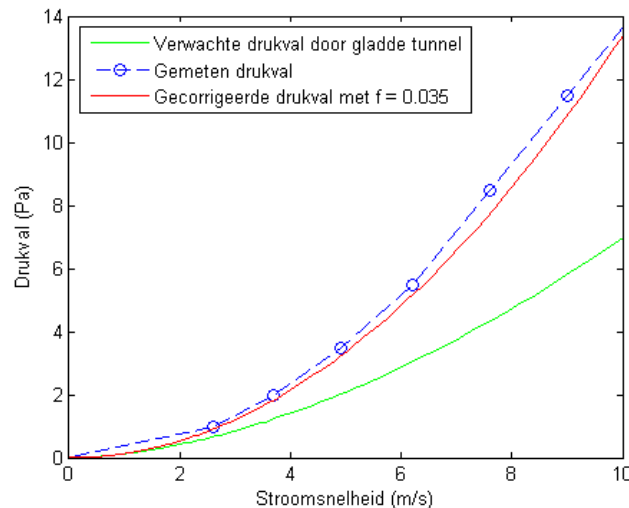
Aan de hand van het Reynolds-getal is af te leiden of de stroming door een buis laminair of turbulent is, wat van invloed is op de stroming in de tunnel en de hierdoor veroorzaakte drukval. Door middel van Vergelijking 3.5 is berekend bij welke stroomsnelheid en debiet er laminair, transitietoneel of turbulent gedrag verwacht kan worden. Hierbij is uitgegaan van een luchttemperatuur van  $25^\circ\text{C}$ , een relatieve luchtvochtigheid van 0% en een luchtdruk van 1 atmosfeer.

Stromingskarakter	Reynolds-getal	Stroomsnelheid in 2U tunnel (m/s)	Debiet in 2U tunnel ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
Laminair	$Re < 2300$	$V < 0,5$	$Q < 77$
Transformationeel	$2300 < Re < 4000$	$0,5 < V < 0,8$	$77 < Q < 124$
Turbulent	$Re > 4000$	$V > 0,8$	$Q > 124$

Tabel 1: Stromingskarakter bij verschillende stroomsnelheden in een 2U tunnel

## Drukval

De drukval in de lege tunnel is bepaald door het drukverschil tussen twee meetpunten te bepalen bij stroomsnelheden tussen 0 en 10m/s. De meetpunten bevinden zich ter plaatse van de testsectie, op de onderzijde en in het midden van de tunnel. De meetpunten zijn 1 meter uit elkaar geplaatst. De gebruikte meetapparatuur en de bijbehorende meetmethode zijn vermeld in Bijlage 7: Meetplan voor het experimenteel verifiëren van het theoretisch model. De resultaten van de metingen zijn weergegeven in 2:



Afbeelding 2: Verwachte, gemeten en gecorrigeerde drukval in de windtunnel over een afstand van 1 meter

De in 2 afgebeelde metingen van de drukval in de tunnel wijken sterk af van de voorspellingen. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat in eerste instantie is uitgegaan van een tunnel met perfect gladde wanden. Vanwege de verschillende materiaaltypes van de tunnel is namelijk moeilijk een inschatting te maken is van de ruwheid. Dit verschil kan enkele oorzaken hebben:

- De onderplaten zijn gemaakt van hardboard. Hoewel hiervan de gladde, geperste kant is gebruikt, heeft dit toch een zekere ruwheid.
- De bovenwand bestaat uit een gelamineerd tafelblad. Hoewel deze zeer glad is, is een lichte houtnerf-structuur voelbaar.
- De onderplaten van de tunnel zijn op enkele plaatsen met duct-tape aan elkaar verbonden.
- De zijwanden zijn, hoewel opgeschuurd met korrel-160 schuurpapier, niet perfect glad. Hiernaast bevatten de zijwanden enkele imperfecties die niet met schuurpapier verwijderd konden worden.

- In de testsectie wordt gebruik gemaakt van afgeschuinde wanden. De balken waarvan de zijwanden gemaakt zijn hebben echter een lichte afronding, zoals is weergegeven in 3. Hierdoor lopen de hoeken licht naar buiten, in plaats van naar binnen.

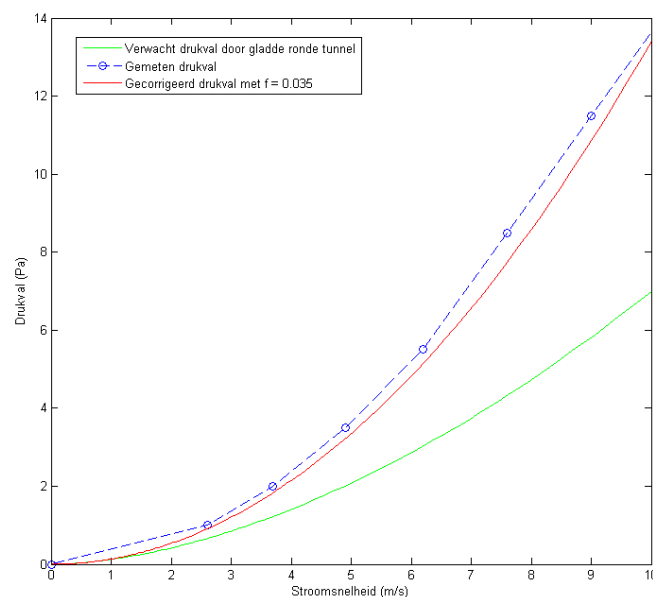


Afbeelding 3: Afronding van de zijwand van de windtunnel

Deze drukval is een functie van de stroomsnelheid, turbulentiekenarakteristieken, geometrie van de tunnel en de frictiewaarde (Munson et al., 2005). De verhouding hiertussen is weergegeven in Vergelijking 3. Bij een turbulente stroming door deze tunnel is de frictiewaarde  $f$  gelijk aan  $f = 0.314 * Re^{-1/4}$  (Munson et al., 2005), waarbij  $Re$  wordt bepaald via de methoden in 3.5.

$$\Delta P = f * \frac{L}{D_h} * \frac{\rho V^2}{2} \quad (\text{Vergelijking 3})$$

Darcy-Weisbach-vergelijking voor drukval. Hierbij is  $\Delta P$  de drukval (Pa),  $f$  de dimensieloze frictie-factor,  $D_h$  de hydraulische diameter van de tunnel (m),  $\rho$  de dichtheid van lucht ( $kg/m^3$ ) en  $V$  de stroomsnelheid in de tunnel (m/s)



Afbeelding 4: Gemeten en gecorrigeerde drukval in 1 meter windtunnel

Via deze frictiefactor is te corrigeren voor wrijvingsverliezen in de tunnel (Boudreau, 2009). De gemeten drukval is via deze vergelijking te gecorrigeerd door een nieuwe waarde voor de frictiefactor te fitten aan de hand van de hierboven gegeven vergelijking voor de drukval. Voor het fitten van deze waarde is gebruik gemaakt van de *Curve Fitting Toolbox* van Matlab R2014a. 3 is hierbij gedefinieerd als functie van  $V$  en  $f$ , met  $\rho$ ,  $L$  en  $D_h$  als constanten. Bij de configuratie van de fit-opties is niet van de standaard-waarden afgeweken. Vervolgens wordt  $\Delta P(V, f)$  met een betrouwbaarheidsinterval van 95% gefit tegen de gemeten stroomsnelheid en druk. De nieuwe frictiewaarde,  $f = 0,035$  komt overeen met een buis met oppervlakteruwheid van 1mm.

# Bijlage 7: Meetplan voor het experimenteel verifiëren van het theoretisch model

## Doel

Het doel van dit experiment is het valideren van het analytisch model voor de koeling van een moederbord in een omhuizing.

Door middel van dit model is te berekenen welke stroomsnelheid benodigd is voor het koelen van een processor en DIMMs voorzien van een heatsink onder volledige belasting, en welke drukval dit veroorzaakt. Bij het opstellen van dit model zijn echter veel aannames gedaan, die door middel van dit experiment getoetst en eventueel aangepast kunnen worden.

Aan de hand van dit model is uiteindelijk te voorspellen op welke manier een volledig gevuld rack gekoeld moet worden. Dit is zo een lijdraad voor de de eisen aan de ventilatie van het datacenter.

## Onderzoeksvragen

In dit experiment staan de volgende onderzoeksvragen centraal.

- Welke ingaande luchtsnelheid door een kanaal met bepaalde afmetingen is benodigd om de temperatuur van de CPUs en DIMMs van een moederbord onder volle belasting binnen de door de fabrikanten aanbevolen limiet te houden;
  - Welke drukval veroorzaakt dit?

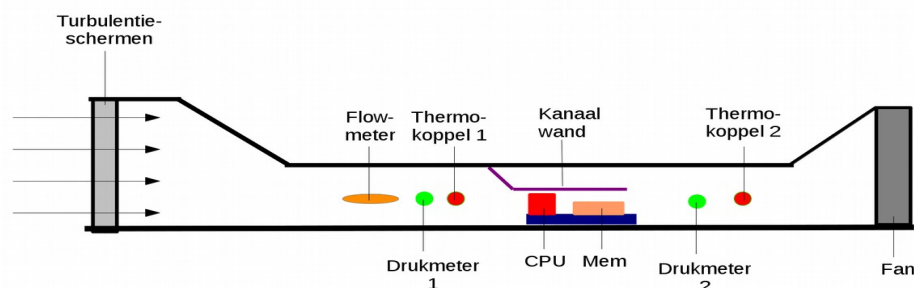
## Uitvoering

Voor dit experiment wordt een moederbord in een kanaal met hoogte  $H$  en breedte 483mm geplaatst.

In de eerste iteratie van het experiment wordt gebruik gemaakt van een hoogte van 89mm, waarbij de afmetingen van het kanaal overeenkomen met een 2U-serverkast.

Eventueel wordt er een vernauwing met hoogte  $H_{\text{kanaal}}$  en breedte  $B_{\text{kanaal}}$  voor de processors geplaatst om lokaal de stroomsnelheid te verhogen.

Vervolgens wordt de stroomsnelheid, druk en temperatuur voor het moederbord, en de druk en temperatuur achter het moederbord bepaald.



## Gebruikte Meetapparatuur

Gebruikte Apparatuur		
Grootheid	Meetbereik	Nauwkeurigheid
Fluke 975 Airmeter (Gloeidraad flowmeter)		
Luchtsnelheid	0,25-15m/s	±4% of ±0,2m/s
Temperatuur	-20-50°C	±0,5°C
Luchtvochtigheid	10-90%	±3%
Fluke 922 Airflow Meter (Pitot-buis flowmeter en differentiele drukmeter)		
Drukverschil	±4000Pa	±1% +1Pa
Luchtsnelheid	1-80m/s	±2,5% @10m/s
Temperatuur	0-50°C	±1% +2°C
Lm_sensors (Software-tool voor uitlezen van computer-statusinformatie)(Lm_sensors, 2014)		
Temperatuur processor-cores	Onbekend	Afhankelijk van processortype, en processorleeftijd.(Intel Corporation, 2007)
Temperatuur DIMMs	Onbekend	Afhankelijk van moederbord

Tabel 1: Gebruikte meetapparatuur en hun meetbereik en nauwkeurigheid

## Nauwkeurigheid en benodigd aantal meetpunten

- **Absolute Nauwkeurigheid**

- **Fluke 975 AirMeter**

Dit instrument is 2009 door Fluke gekalibreerd, waarna er weinig meer mee gemeten is. Er kan daarom aangenomen worden dat de nauwkeurigheid van het instrument overeenkomt met de waarden in het calibratierapport.

- **Fluke 922 Airflow Meter**

Dit instrument is niet gekalibreerd. Aangezien ook deze meter weinig gebruikt is kan aangenomen worden dat de nauwkeurigheid overeenkomt met de in de handleiding gespecificeerde waarden.

Voor het starten van een reeks metingen wordt het instrument losgekoppeld en het nulpunt opnieuw ingesteld. Hiermee wordt eventuele verschuiving van het meetresultaat voorkomen.

- **Relatieve Nauwkeurigheid**

Voor het bepalen van het benodigd aantal metingen is het van belang de nauwkeurigheid van de metingen te bepalen. Deze hangt hoofdzakelijk af van de afwijking in de meetapparatuur en fluctuaties in de luchtstroom. Hiervoor worden bij een  $V_{tunnel}$  van 5 m/s met elk meetinstrument 60 metingen gedaan, waarbij gepoogd wordt een meetfrequentie van 2Hz aan te houden. Hiervan wordt vervolgens de standaarddeviatie ( $\sigma$ ) bepaald volgens Vergelijking 1:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

Het benodigd aantal metingen (N) voor een betrouwbaarheid van 95% volgt vervolgens uit Vergelijking 2:

$$N = \frac{\sigma^2 (z_{1-\beta} + z_{1-\alpha/2})^2}{(\mu_0 - \mu_1)^2} \quad (\text{Vergelijking 2})$$

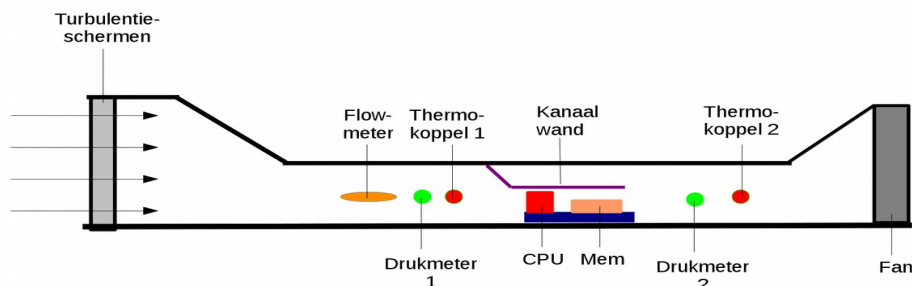
Hierbij is  $\sigma$  de standaarddeviatie, Z de gestandaardiseerde stochastische variabele,  $\mu_0$  het verwachtingsgemiddelde, en  $\mu_1$  de te detecteren afwijking.

## Benodigde grootheden

Grootheid	Afkorting	Instrument	Benodigd aantal metingen
Hoogte van het luchtkanaal.	H	Schuifmaat	1
Breedte van het luchtkanaal.	B	Schuifmaat of lineaal	1
Snelheid van de luchtstroom door het luchtkanaal.	$V_{kanaal}$	Fluke 975	1
Luchtdruk in dit kanaal voor het moederbord	$P_{voor}$	Fluke 922	1
Luchtdruk in dit kanaal achter het moederbord	$P_{achter}$	Fluke 922	1
Temperatuur van de core van de processors.	$T_{cpu}$	Lm_sensors	1
Temperatuur van de core van de DIMMs.	$T_{DIMM}$	Lm_sensors	1
Temperatuur van de ingaande lucht.	$T_{lucht-in}$	Fluke 975	1
Omgevingstemperatuur.	$T_{omgeving}$	Fluke 975	1
Omgevingsdruk.	$P_{omgeving}$	Fluke 975	1

## Meetpunten

- Flowmeter in het midden van de tunnel op 20 cm afstand van de voorste rand van het moederbord.
- Aansluiting voor drukmeter in het midden van de tunnel op 15 cm afstand van de voorste rand van het moederbord.
- Aansluiting voor drukmeter in het midden van de tunnel op 15 cm afstand van de achterste rand van het moederbord.
- Processor-core; de temperatuur hiervan wordt uitgelezen door middel van het programma Lm-sensors.
- DIMMs; de temperatuur hiervan wordt uitgelezen door middel van Lm\_sensors.
- Thermometer op 1m afstand van de inlaat van de windtunnel.
- Hygrometer op 1m afstand van de inlaat van de windtunnel.



Afbeelding 1: Schematische weergave van de meetpunten in de tunnel



## **Positie van drukmeetpunten**

Omdat de ducting te kort is om een drukmeting uit te kunnen voeren is het tweede meetpunt na het moederbord geplaatst. Op deze plek is in scenario 1 en 2 het frontaal oppervlak echter groter dan voor het moederbord. Dit zorgt ervoor dat het gemeten drukverschil hoger is dan het daadwerkelijke drukverschil over het moederbord. Om hiervoor te corrigeren is gebruik gemaakt van de wetten van Bernoulli (Munson et al., 2005). Hierbij wordt aangenomen dat de luchtstroom non-compressiebel is.

$$V_{tunnel} = A_{tunnel} * \frac{V_{duct}}{A_{duct}}$$

$$\Delta P_{duct} = 0.5 * (2 * \Delta P_{tunnel} + \rho V_{duct}^2 - \rho V_{tunnel}^2)$$

## **Methode van dataverzameling**

Het verzamelen van meetgegevens gebeurt door middel van LabView. Deze bevat een GUI voor de invoer van handmatig verzamelde meetgegevens en leest geautomatiseerd de temperatuur van de CPU en DIMMs uit.

De temperaturen worden geplott in een window van 120 seconden om te kunnen zien of er een steady-state bereikt is.

De temperaturen en handmatig ingevoerde data wordt na een druk op de knop met timestamp opgeslagen.

- Temperatuur CPU en DIMMs.
  - LabView roept bij het starten van een meting een bat-script aan dat het volgende doet:
    - Maken van een SSH-verbinding met de server dmv Putty (PuTTY Team, 2014) (plink.exe)
    - Op de server het commando “/usr/bin/sensors | grep '°C' | cut -c18-21” uitvoeren.
    - Dit geeft als resultaat de temperaturen van de CPUs en DIMMs.
- Druk:
  - 1 meting uitvoeren met de Fluke 992 van het drukverschil over het moederbord.
  - Data wordt ingevoerd in de LabView GUI.
- Flow:
  - 1 metingen uitvoeren met de Fluke 975 van de stroomsnelheid over het moederbord.
  - Data wordt ingevoerd in de LabView GUI.
- Temperatuur en druk buiten windtunnel
  - Voor en na een meetreeks een meting uitvoeren met de Fluke 975
  - Data wordt ingevoerd in de LabView GUI.

## **Meetplan**

### **A. Voorbereiding**

1. Windtunnel inclusief server inrichten voor 2U hoogte en volledige horizontale ducting om heatsinks.
2. Instrumenten aansluiten en werking controleren.
3. Bepalen van benodigd aantal meetpunten voor druk, stroomsnelheid en temperatuur.
4. Grove plot maken van stroomsnelheid vs. stand van potmeter zodat ik een idee heb van welke waarden zinnig zijn.
5. Berekenen welke stroomsnelheid  $V$  nodig is om de processoren onder 100% belasting voldoende te koelen.
6. Berekenen welke drukval en case-temperatuur verwacht worden voor  $V+[30, 20, 10, 0, -10, -20, -30]\%$

### **B. Uitvoeren van metingen**

1. Ventilator instellen op  $V+30\%$
2. Server inschakelen en beginnen met temperatuur controleren en plotten.
3. Server voor 100% belasten en temperatuur controleren.
4. Als de CPU of DIMMs te warm worden het experiment afbreken.
5. Meting uitvoeren voor  $V+[30, 20, 10, 0, -10, -20, -30]\%$
  
6. Windtunnel inrichten voor server met 2U hoogte en halve horizontale ducting om de heatsinks.
7. Stap B1 t/m B5 herhalen.
  
8. Windtunnel inrichten voor server met 2U hoogte zonder horizontale ducting.
9. Stap B1 t/m B5 herhalen.
  
10. Windtunnel inrichten voor server met 1U hoogte en volledige horizontale ducting.
11. Stap B1 t/m B5 herhalen.
  
12. Als de voorgaande metingen goed aan de theorie te relateren zijn kunnen de volgende stappen achterwege gelaten worden.
  
13. Windtunnel inrichten voor server met 1U hoogte en halve horizontale ducting.
14. Stap B1 t/m B5 herhalen.
  
15. Windtunnel inrichten voor server met 1U hoogte zonder horizontale ducting.
16. Stap B1 t/m B5 herhalen.

## Bijlage 8: Correcties aan het theoretisch model

### **Correcties van meetresultaten**

De gemeten waarden wijken op een aantal punten sterk af van de voorspellingen. Dit is het gevolg van de aannames die gedaan zijn bij het opstellen van het model. Bij de modelvorming werd verwacht dat de invloed van enkele effecten verwaarloosbaar zou zijn; dit bleek achteraf niet te kloppen. Bij het aanpassen van het model zijn achtereenvolgens de volgende aannames gecorrigeerd:

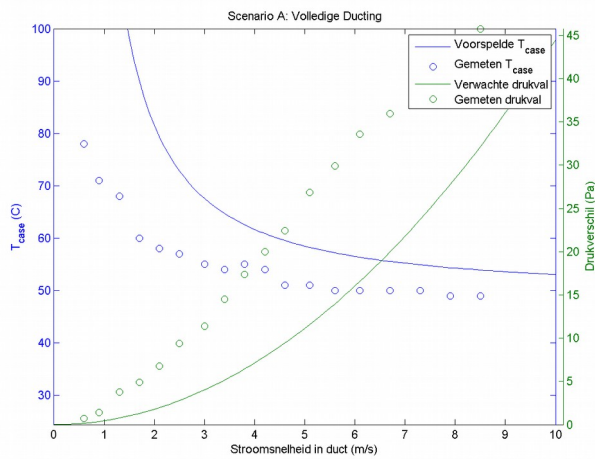
- De drukval in de tunnel is verwaarloosbaar.
- Het effect van conductie (geleiding) door de bevestiging van het koelblok is verwaarloosbaar.

### **Drukval in de tunnel**

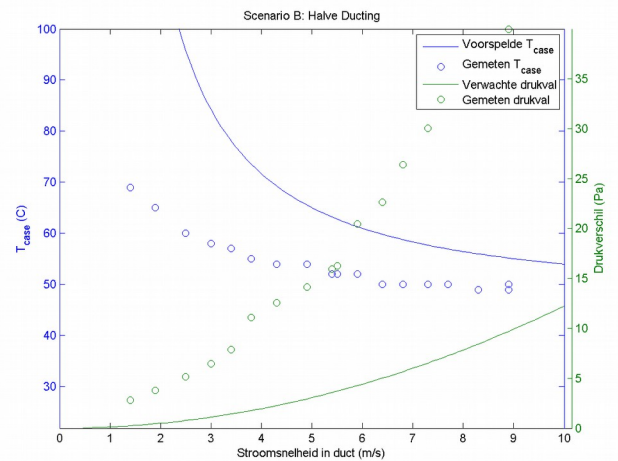
In eerste instantie is uitgegaan van een gladde tunnel waarvan de wrijving een functie is van het Reynolds-getal volgens  $f = 0.314 * Re^{\frac{1}{4}}$ . Zoals blijkt uit de meetresultaten van een lege tunnel is de drukval in de tunnel weldegelijk van invloed op de gemeten waarden, zoals wordt weergegeven in Afbeelding . Op basis van de in Bijlage 5 bepaalde frictie-waarde van de tunnel en de Darcy-Weisbach-vergelijking (weergegeven in Vergelijking 1) is de drukval tussen de druk-meetpunten en de randen van het moederbord bepaald. Deze drukval wordt opgeteld bij de berekende drukval.

$$\Delta P = f * \frac{L}{D_h} * \frac{\rho V^2}{2} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

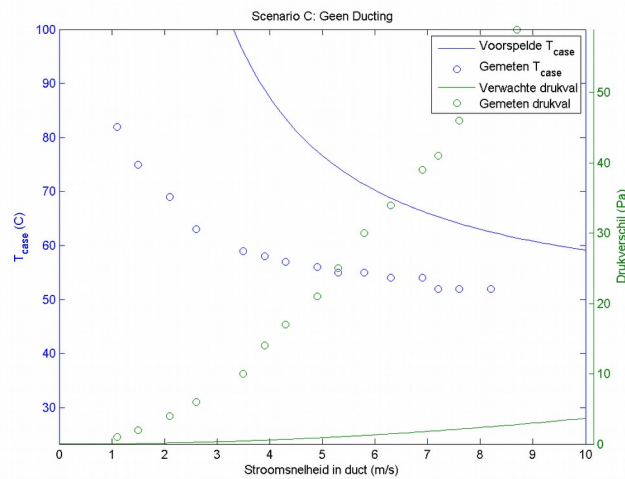
Darcy-Weisbach-vergelijking voor drukval. Hierbij is  $\Delta P$  de drukval (Pa),  $f$  de dimensieloze frictiefactor,  $D_h$  de hydraulische diameter (m),  $\rho$  de dichtheid van lucht ( $kg/m^3$ ) en  $V$  de stroomsnelheid in de tunnel (m/s)



Afbeelding 1: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario A op basis van het initiële model



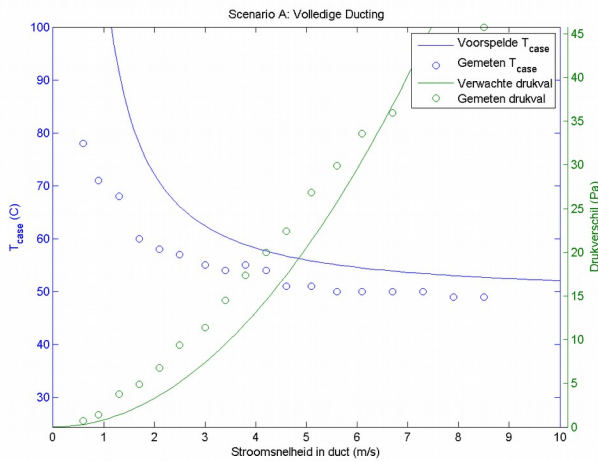
Afbeelding 2: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario B op basis van het initiële model



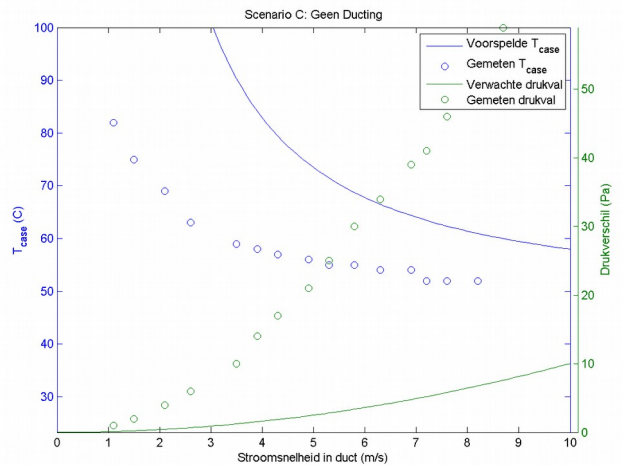
Afbeelding 3: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario C op basis van het initiële model

## Hoogte van het moederbord en de processor

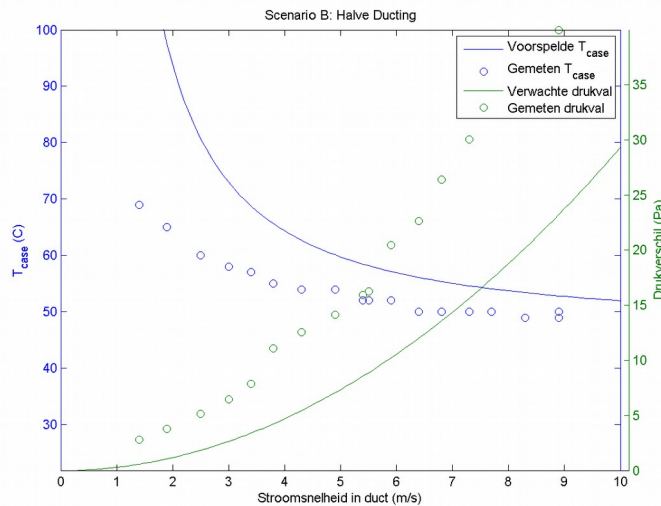
Ik ben ervan uitgegaan dat het moederbord in verhouding tot het koelblok een verwaarloosbare drukval zou veroorzaken. Voor de correctie hiervan is in eerste instantie gepoogd te corrigeren voor de ongelijkmatigheden op het moederbord door de effectieve hoogte hiervan te verminderen. Hierbij is echter geen rekening gehouden met de hoogte van het moederbord zelf, dat middels afstandshouders aan de onderplaat gemonteerd is. Bovendien heeft de processor zelf een hoogte van 8mm. Samen levert dit een extra hoogteverschil van 18mm op, waardoor een 2U-omhuizing van 89mm hoog, slechts 71mm hoog is.



Afbeelding 4: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario A op basis van correctie van de hoogte van moederbord en processor



Afbeelding 5: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario B op basis van correctie van de hoogte van moederbord en processor



Afbeelding 6: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario C op basis van correctie van de hoogte van moederbord en processor

## Fricctie van de tunnel

De verhoging in drukval die hierdoor veroorzaakt wordt is echter niet genoeg om het verschil te kunnen verklaren. Blijkbaar hebben de componenten op het moederbord een dusdanig grote invloed op de luchtstroom dat er niet aangenomen kan worden dat dit deel van de tunnel wrijvingsloos is.

Om hiervoor te kunnen corrigeren is de vergelijking voor de verhouding tussen  $V_{bypass}$  en  $V_{hs}$  met de Darcy-Weisbach-vergelijkingen voor stroming over het moederbord:

$$\frac{\rho V_{duct}^2}{2g} + P_1 = \frac{\rho V_{bypass}^2}{2g} + P_2 + \Delta P_{bypass}, \quad (1a)$$

$$= \frac{\rho V_{hs}^2}{2g} + P_2 + \Delta P_{hs} \quad (1b)$$

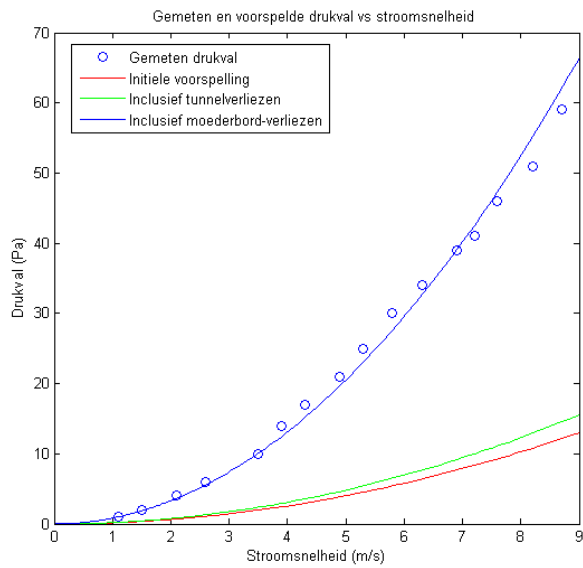
$$\Delta P_{bypass} = f_{bypass} \frac{L}{W_{duct}} \frac{\rho V_{bypass}^2}{2} \quad (2)$$

$$V_{bypass}^2 = \frac{2g * \Delta P_{hs} + \rho V_{hs}^2}{\rho + \frac{f_{bypass} * g L \rho}{D_h}} \quad (3)$$

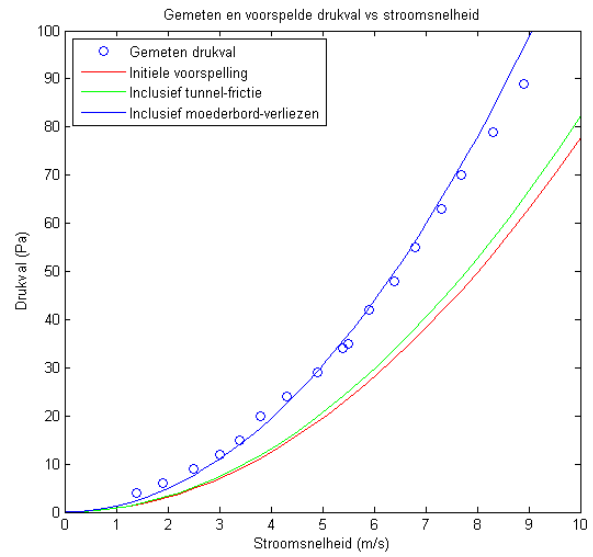
$$V_{duct} = \frac{V_{hs} A_{hs} + V_{bypass} A_{bypass}}{A_{duct}} \quad (4)$$

$$\Delta P_{duct} = \frac{2g \Delta P_{hs} - g \rho V_{duct}^2 + \rho V_{hs}^2}{2g} \quad (5)$$

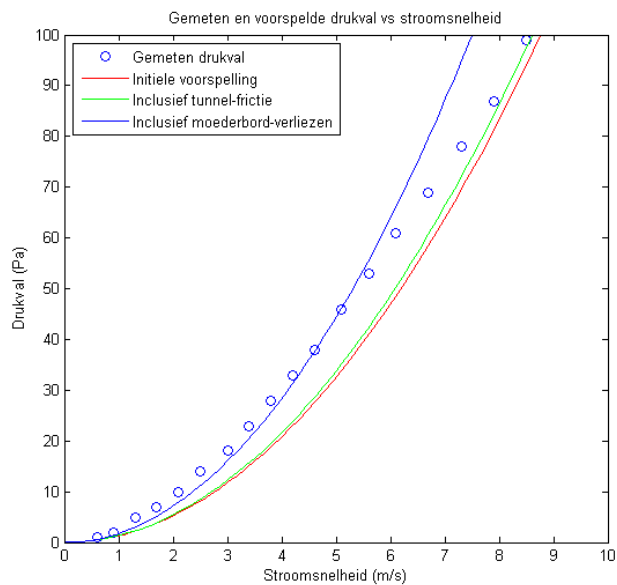
Door deze te fitten is voor verschillende regio's van het moederbord de wrijvingscoëfficiënt bepaald. Hierbij valt op dat er naast de frictie nog een extra effect optreedt; de gemeten drukval loopt vanaf  $\pm 5$  m/s minder snel op dan verwacht wordt. Dit komt omdat de frictie-factor afhankelijk is van de stroomsnelheid. Het hierdoor veroorzaakte verschil zal groter worden bij toenemende stroomsnelheid. Er wordt echter niet verwacht dat stroomsnelheden  $> 5$  m/s benodigd zullen zijn, waardoor deze effecten verwaarloosbaar zijn. Het effect van deze correcties is te zien in Afbeelding 7 t/m 9.



Afbeelding 7: Gemeten en voorspelde drukval van Scenario A op basis van correctie voor de hoogte van het moederbord en processor, en de frictie



Afbeelding 8: Gemeten en voorspelde drukval van Scenario B op basis van correctie voor de hoogte van het moederbord en processor, en de frictie



Afbeelding 9: Gemeten en voorspelde drukval van Scenario C op basis van correctie voor de hoogte van het moederbord en processor, en de frictie

## Warmtetransport via conductie

In de lagere flow-regiën lijkt meer warmtetransport plaats te vinden dan verklaard kan worden via geforceerde convectie door een heatsink. Dit zou veroorzaakt kunnen worden door warmtegeleiding van de heatsink naar het chassis. De koelblokken zijn met 4 stalen M6 bevestigingsbouten en afstandsbussen gemonteerd aan het chassis. De bouten verbinden de basis van het koelblok met de onderplaat van het chassis. Vanwege het grote oppervlak van deze onderplaat kan aangenomen worden dat deze plaat dezelfde temperatuur heeft als de langstromende lucht. De eigenschappen van deze bevestigingsmaterialen zijn weergegeven in 1.

Onderdeel	Thermische geleidbaarheid ( $W/mk$ )	Oppervlak ( $mm^2$ )	Lengte (mm)
M6 Bout	50	28	14
Afstandsbus	50	10	10

Tabel 1: Eigenschappen van de bevestigingsmaterialen van een SuperMicro SNK-0025P koelblok. Elk koelblok is met 4 bouten en 4 afstandsbussen bevestigd aan de onderplaat.

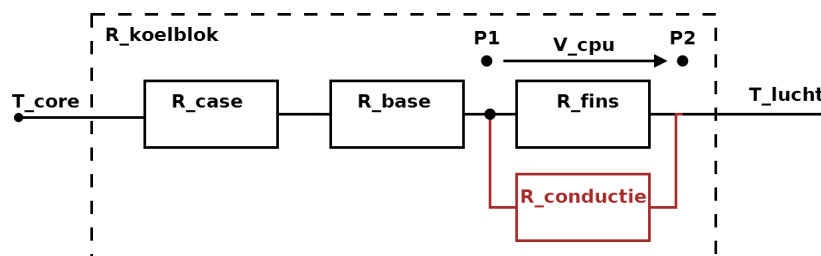
Het warmtetransport dat door conductie veroorzaakt wordt is afhankelijk van de thermische weerstand van het bevestigingsmateriaal, dat afhankelijk is van het totale doorsnede-oppervlak en lengte hiervan. De vergelijkingen voor de thermische weerstand zijn weergegeven in 3.5:

$$U = \frac{kA}{\Delta x} \quad (1a) \quad \text{(Vergelijking 2)}$$

$$R = \frac{1}{U} \quad (1b)$$

Uit deze vergelijkingen volgt dat de bevestigingsmaterialen een thermische weerstand ( $R_{conductive}$ ) hebben van  $0,99 (m^2 K)/W$ . De totale warmte weerstand van het koelblok is nu als volgt te berekenen volgens Vergelijking 3. Het aangepaste theoretische model voor de beschrijving van warmtetransport in een koelblok, waaraan het warmtetransport via conductie is toegevoegd, is in 10 schematisch weergegeven.

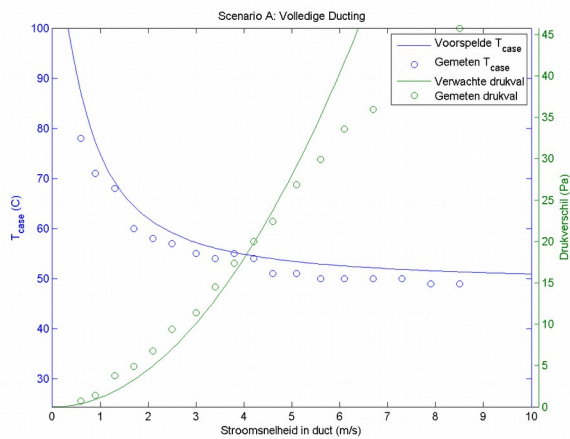
$$R_{koelblok} = R_{case} + R_{base} + \frac{1}{\frac{1}{R_{fins}} + \frac{1}{R_{conductive}}} \quad \text{(Vergelijking 3)}$$



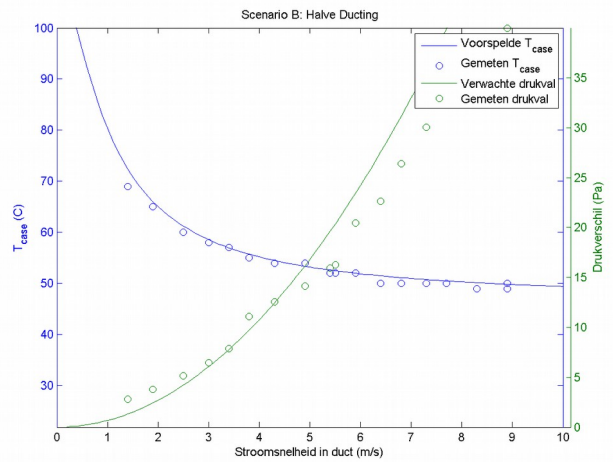
Afbeelding 10: Het aangepaste theoretische model, waarbij het warmtetransport via conductie in het rood is weergegeven.



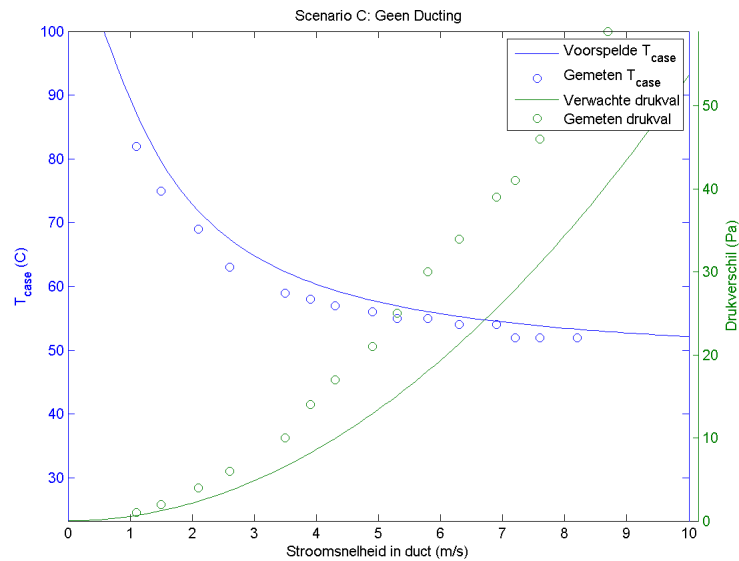
Het effect van conductie is weergegeven in figuur 11 t/m 13.



Afbeelding 11: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario A op basis van correctie voor de hoogte van het moederbord en processor, de frictie en conductie



Afbeelding 12: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario B op basis van correctie voor de hoogte van het moederbord en processor, de frictie en conductie



Afbeelding 13: Gemeten en voorspelde temperatuur en drukval van Scenario C op basis van correctie voor de hoogte van het moederbord en processor, de frictie en conductie

## Conclusie

Zoals blijkt uit de bovenstaande verhandeling over de correctie van de meetresultaten is door middel van het gecorrigeerde model nu een goede voorspelling te maken van de temperatuur van een processor en de door het moederbord veroorzaakte drukval.

Op basis van het opgestelde model is een voorspelling gemaakt over het koelgedrag van een server bij een *worst-case* scenario met inlaattemperatuur van 35°C en 0% luchtvochtigheid. Bij het maken van deze voorspelling zijn een aantal mogelijke vormen van ducting geëvalueerd voor een behuizing met een 2U form-factor. Zoals gebleken is in Bijlage 4 biedt de 2U-form-factor een goede balans tussen drukval en formaat. Ook zijn de door SuperMicro gebruikte koelblokken geoptimaliseerd voor gebruik in een chassis met reguliere (1U, 2U of 3U) afmetingen.