

In kantoren met een vrije indeling

Modelleren en simuleren van individueel geregelde zones

Veel praktijkonderzoeken naar kantooromgevingen laten zien dat volledige thermische tevredenheid van gebruikers alleen kan worden bewerkstelligd door het binnenklimaat te regelen naar de individuele voorkeuren van de gebruikers. De meeste kantoren met een vrije indeling ondersteunen deze behoefte niet. Bovendien leidt de onregelmatige bezetting van dergelijke kantoren tot een suboptimaal energiegebruik. Dit artikel zal tonen hoe het ontwerp van dergelijke kantoren kan worden ondersteund door hulpmiddelen die de individuele thermische voorkeuren van gebruikers en schema's integreren in prestatiesimulaties van verschillende scheidingsconstructies, luchtbehandelingsinstallaties en regelstrategieën. Deze simulaties worden verricht voor het testen en evalueren van deze systemen tot de tevredenheid van de gebruikers en het beperken van het energiegebruik. Om dit te demonstreren is gebruik gemaakt van een case studie.

- door prof.dr. G. Zimmermann

Er wordt in veel organisaties gebruik gemaakt van kantoren met een vrije indeling vanwege de flexibiliteit voor reorganisaties en vanwege andere voordelen. Een groot nadeel is dat het thermische klimaat in kantoren met een vrije indeling lastig in kleine zones te beheersen is. Daarom worden grote kantoren met een vrije indeling typisch geregeld als één zone met als doel het voorzien in een uniform binnenklimaat. Veel laboratorium- en praktijkonder-

zoeken zijn verricht om de optimale thermische parameters te definiëren die in een maximaal gebruikerscomfort voorzien, terwijl ook het energiegebruik wordt geminimaliseerd. De resultaten zijn gepubliceerd als ASHRAE-standaard 55-1992 en als ISO 7730-1994. Zij definiëren de optimale relatie tussen de lucht- en stralings-temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid, genaamd de effectieve temperatuur *ET*. Theoretisch gezien zou navolging van deze richtlijnen resul-

ten in 95 % tevredenheid van de gebruikers.

Een groot aantal praktijkonderzoeken waarbij de thermische condities direct op individuele werkplekken werden gemeten en de resultaten in verband werden gebracht met vragenlijsten die kantoormedewerkers, werkzaam op deze werkplekken, hadden ingevuld tonen echter een veel lager tevredenheidsniveau, typisch tussen 50 en 80 %. Dit resultaat is in grote mate onafhankelijk van navolging van de richtlijnen. Met ons huidige technologie-niveau in luchtbehandelingsinstallaties en regelsystemen is het onacceptabel om kantoren te ontwerpen en vervaardigen met een dergelijk laag niveau van gebruikerscomfort.

Een tweede probleem van de grote regelingszones in kantoren met een vrije indeling is het energiegebruik. Bij de meeste organisaties zijn de werktijden bijvoorbeeld niet meer van 8:00 tot 17:00. Werktijden zijn veel flexibeler, in extreme gevallen zijn de kantoren 's nachts en in de weekenden ook gedeeltelijk bezet. Dit betekent voor

Vertaling van "Modeling and Simulation of Individually Controlled Zones in Open-Plan Offices – A Case Study", door ir. P.M. Brigggen, afgestudeerd bij de unit Building Physics & Systems van de TU Eindhoven en mw. ir. L. Schellen, promovenda bij de unit Building Physics & Systems van de TU Eindhoven.

de thermische beheersing van de kantoren met een vrije indeling dat de energiebesparende perioden waarin het systeem lager kan worden gezet in grote mate worden verminderd, als te allen tijde in comfortcondities wordt voorzien bij bezetting van de werkplek. Beide problemen kunnen alleen worden opgelost als de grootte van thermische regelingszones wordt beperkt tot de afmeting van individuele werkplekken, en wanneer zulke *micro-zones* worden geregeld naar individuele voorkeuren en afhankelijk zijn van de werkelijke bezetting. Dit zou het doel moeten zijn van architecten en ingenieurs bij de indeling van de kantoren met een vrije indeling en bij de selectie van de installaties en regelsystemen. Op het eerste gezicht lijkt dit technisch onmogelijk, maar dat is niet zo. Het probleem is eerder dat niet genoeg ervaring bestaat en dat het proefondervindelijk opdoen van ervaring erg kostbaar is. De oplossing die wij voorstellen is om case studies te verrichten in echte kantoren en om de resultaten daarvan te gebruiken voor het bouwen van modellen en simulatieomgevingen in navolging van de meetresultaten. Deze modellen en simulatieomgevingen kunnen worden gebruikt om verschillende ontwerpalternatieven te evalueren voor het ontwerp van nieuwe kantoren met een vrije indeling en voor het renoveren van bestaande kantoren. Dit wordt gedeeltelijk gedemonstreerd in dit artikel. We hebben de beschikking over een kantoor met een vrije indeling dat is uitgerust met een geschikte luchtbehandelingsinstallatie en gebruiken dit kantoor als case studie. We hebben dit kantoor gemodelleerd voor simulatiedoeleinden en zullen laten zien in hoeverre de eerder gestelde

doelen kunnen worden bereikt door verschillende ontwerpalternatieven te testen. Andere variabele parameters zijn klimaatbestanden, bezettingspatronen en thermische voorkeuren van gebruikers. Geselecteerde resultaten zullen worden getoond om de kracht van simulatie te demonstreren.

INDIVIDUEEL COMFORT

Praktijkonderzoeken

Het thermisch comfort van individuen is een complexe functie van verschillende temperaturen, luchtvochtigheid, luchtstromingen, kleding, metabolisme en andere parameters. De operationele temperatuur T_o is gedefinieerd als een lineaire functie van de luchttemperaturen T_a op verschillende hoogten van het lichaam (0,1; 0,6 en 1,0 m boven de vloer) en van de gemiddelde stralingstemperatuur T_s van de omliggende oppervlakken. De natte operationele temperatuur T_{oh} is een complexe functie van T_o en de luchtvochtigheid en bepaalt het warmteverlies van de huid. De nieuwe effectieve temperatuurindex ET^* is gedefinieerd als T_{oh} bij een relatieve luchtvochtigheid RV van 50 %. In dit artikel verwijzen we altijd naar ET^* wanneer we waarden van de binnentemperatuur laten zien. De ISO-norm definieert de volgende setpoints als optimum voor het zomer- en winterseizoen:

$$ET^* = 23,5 \pm 1,2 \text{ }^\circ\text{C (zomer)} \quad (1)$$

$$ET^* = 22,5 \pm 1,2 \text{ }^\circ\text{C (winter)} \quad (2)$$

Omwille van de lage tevredenheidsniveaus die zijn gevonden in vragenlijsten die zijn ingevuld door kantoormedewerkers, zijn wereldwijd gestandaardiseerde praktijkonderzoeken verricht.

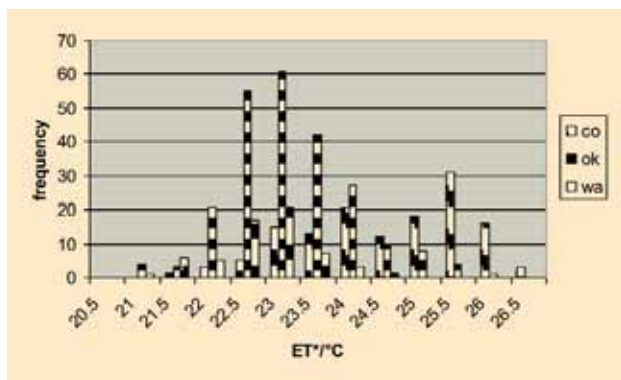
De verzamelde data zijn gepubliceerd als database [2]. Een gedetailleerde analyse [3] heeft geleid tot de definitie van een adaptief comfortmodel met een variabele comforttemperatuur ET^*_{comf} gebaseerd op een variabel gemiddelde van de buitentemperaturen ET^*_{outd} van n recente dagen:

$$ET^*_{\text{comf}} = 22,6 + \frac{0,04}{n} \sum_{i=1}^n ET^*_{\text{outd}} \quad (3)$$

We hebben sommige data vanuit een ander perspectief geanalyseerd. Als we aannemen dat ieder individu zijn eigen persoonlijke comforttemperatuur en -range heeft, en dat dit zelfs varieert met het seizoen en de tijd op een dag, dan moeten alle pogingen om optimale setpoints voor grote regelingszones te vinden wel falen.

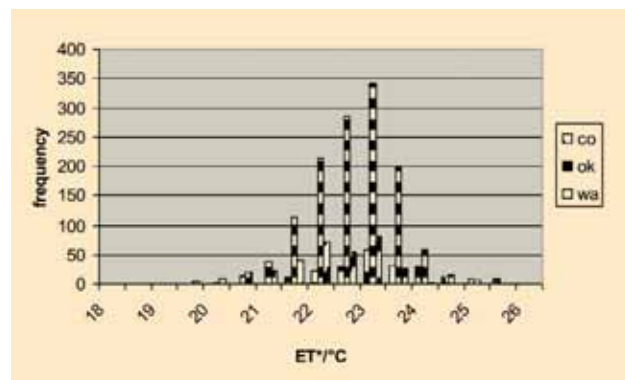
Verschillende tevredenheidsschalen zijn gebruikt voor de vragenlijsten. Hier hebben we de MCI thermische voorkeursschaal met slechts drie categorieën gebruikt: *co=wil koeler*, *ok=geen verandering* en *wa=wil warmer*. Meer verfijnde categorieën toonden geen betere relatie met de gemeten parameters. Omdat de gebruikers in de praktijkonderzoeken niet de mogelijkheid hadden om hun eigen comforttemperaturen in te stellen, dienen we aan te nemen dat de gerapporteerde temperaturen nauw zijn gerelateerd aan de gewenste temperaturen in het geval van gerapporteerde *ok*-waarden. De andere twee categorieën dienen te worden geïnterpreteerd in overeenstemming met de betekenissen ervan.

Voor demonstratiedoeleinden hebben we een zomer- en een winter case studie geselecteerd. De eerste is met 453 individuen verricht in Montreal in de



Verdeling van het aantal personen in drie verschillende thermische prestatiecategorieën voor kantoortemperaturen gedurende de zomer in Montreal.

- FIGUUR 1 -



Verdeling van het aantal personen in drie verschillende thermische prestatiecategorieën voor kantoortemperaturen gedurende de winter in Ottawa.

- FIGUUR 2 -

zomers van 1994-1995. Onder de gegeven temperaturen van een gebouw met airconditioning wilde 53 % geen verandering, 32 % wilde lagere en 15 % wilde hogere temperaturen. Figuur 1 toont de verdeling van het aantal personen in de drie categorieën voor verschillende temperaturen. In dit geval is er een grote correlatie tussen de gewenste verandering en de gemiddelde temperatuur, maar er is nog steeds een sterker aanwezige overlap van de ranges in de drie categorieën. Het meest opvallende resultaat is de grote range van temperaturen die voldoening schenken. Als we aannemen dat deze range niet wordt veroorzaakt door de grote tolerantie van de individuen, dan betekent deze range duidelijk dat gedurende het zomerseizoen een setpointrange van 21 tot 26 °C dient te worden gerealiseerd voor iedere werkplek om te voorzien in comfortabele temperaturen in een kantoor met vele individuen.

De spreiding van de gemeten temperaturen is groot ondanks computergestuurde airconditioning. Dit kan een reden zijn voor het lage tolerantieniveau van 53 %. Als we kijken naar de temperatuur van 23 °C die een maximum van gebruikers acceptabel vond, blijkt dat het tolerantieniveau bij die temperatuur 63 % bedraagt. Dit is nog steeds veel lager dan de 95 % die wordt voorspeld door de richtlijnen. Als conclusie dient er te worden geaccepteerd dat er geen standaard temperatuur is die nagenoeg 100 % van de kantoormedewerkers tevreden kan stellen.

Figuur 2 toont dezelfde verdeling voor kantoren in Ottawa in de winter van 1994-1995 voor 1.859 individuen. De temperatuurrange voor individuen die 'ok' stemmen is van 18,5 tot 25,5 met een meerderheidsstem voor 23 °C. Dit betekent dat zomer en winter voor het Canadese klimaat geen significante verschillen vertonen in de gewenste temperatuurinstelling. Verrassend is dat in dit geval de meerderheidsstemmen voor zowel 'wil warmer' als voor 'wil koeler' ook bij 23 °C worden gevonden. Deze bevinding ondersteunt de aanname dat individuele voorkeuren veel belangrijker zijn dan standaardinstellingen.

Tevredenheidsmodel

Omdat het tevredenheidsmodel, dat ten grondslag ligt aan de richtlijnen waarin het *percentage ontevreden personen* (PPD) als functie van de *voorspelde gemiddelde waardering* (PMV) [4] wordt voorspeld, niet kan worden gevalideerd met behulp van de gerapporteerde praktijkonderzoeken, zullen we een eigen tevredenheidsmodel definiëren om het mogelijk te maken om tevredenheidsniveaus *sat* te kunnen beoordelen uit simulatie- en meetresultaten. Om de beoordeling te vereenvoudigen stellen we een cosinuswet voor:

$$sat = \cos((T_p - ET^*) \cdot rt \cdot 0,5 \cdot \pi) \text{ for } ET^* \pm rt, = 0 \text{ else} \quad (4)$$

waarin T_p de individueel gewenste temperatuur voorstelt en rt de tolerantierange.

Tevredenheid wordt aangenomen als de temperatuur ET^* binnen $0,5 \cdot rt$ van T_p ligt. Dat betekent dat *sat* groter dan 0,71 dient te zijn. De ontwerp- en onderhoudsdoelstelling van kantoren met een vrije indeling zou moeten zijn om $sat=1$ te benaderen voor het individu en de tevredenheid $satA=1$ gemiddeld voor alle gebruikers van de ruimte. Als tweede tevredenheidsmaatregel wordt het percentage van tijd $satT$ berekend gedurende de tijd waarin de temperatuur ET^* binnen de tevredenheidsrange valt. Beide maatregelen zullen worden gebruikt in de paragraaf met resultaten.

BEZETTING

Praktijkonderzoeken

Enige praktijkonderzoeken naar het bezettingsniveau van kantoren zijn verricht om verschillende redenen. Twee van dergelijke studies [7 en 8] beoordeelden hoe individuen kunstmatig en natuurlijk licht regelden. Resultaten van video-observatie laten ook zien dat individuele werkplekken tussen 6:00 en 20:00 een maximaal bezettingsniveau van minder dan 60 % hebben.

Een ander praktijkonderzoek is verricht in universiteitskantoren om ruimtegebruik te modelleren en simuleren [9]. De data zijn gebaseerd op vele jaren van vragenlijsten die zijn voorgelegd aan werknemers van de universiteit en deels gecontroleerd met behulp van RFID-tags. Het resultaat is

een softwarehulpmiddel USSU dat individuele schema's van persoonlijke en werkgerelateerde taken produceert over de positie van de werkplek en andere locaties. Het voorziet daarnaast in routing door publieke ruimtes en tijdsduren van een uitstapje. We hebben onderzoek verricht aan de hand van eenvoudige vragenlijsten over de werkgewoonten in een universiteitskantoor IWS dat we gebruiken voor de case studie (zie paragraaf 5.1).

Bezettingsmodel

Voor onze simulatiedoelinden hebben we een schematiserend model gemaakt voor individuen, taken en werkplekken. Ieder individu bepaalt de tijd waarop wordt begonnen en gestopt met het verrichten van een taak in het kantoor. De tijden zijn gebaseerd op gewenste gemiddelden en willekeurige ranges. De individuen bepalen daarnaast de tijden voor persoonlijke pauzes, willekeurig gebaseerd op het aantal keren dat het voorkomt. Wanneer een taak wordt begonnen bepaalt dit alle werkgerelateerde schema's en werkplekken. Primaire taken worden ingedeeld als regelmatig (lessen, vergaderingen) en onregelmatig (ad hoc vergaderingen). Enkele secundaire taken zoals *naar de printer gaan* worden aangestuurd door de primaire taken. We nemen aan dat kantoormedewerkers een primaire taak uitvoeren aan hun bureau op ieder moment dat een andere taak wat tijd over laat. Dit lijkt typerend voor vele banen. Gewenste omgevingsparameters, zoals thermische eigenschappen, verlichtingsniveaus en geluidsoverlast zijn afhankelijk van het individu en de taak. Beide invloeden worden samen met de data over de ruimtebezetting doorgegeven aan de werkplekken en van daaruit aan de regelingssystemen. Deze elementen zijn gemodelleerd en geïmplementeerd in een multi-agent-systeem [10]. Het systeem leest individuele en werkgerelateerde parameters uit bestanden. Voor de huidige case studie, die is verricht met gebruikmaking van de commerciële prestatie simulatieomgeving TRNSYS™, diende een vereenvoudigd model opnieuw te worden omgezet in MATLAB™. Als een ruimte op een bepaald tijdstip wordt bezet door meer dan één gebruiker, dan worden de gewenste temperaturen en tolerantieranges gemiddeld.

Micro-zone klimaatregeling

In gebouwen met een klimaatinstallatie wordt de klimaatregeling per zone aangestuurd. De regeling per zone voorziet in een uniform binnenklimaat door de hele zone heen. Als veel personen een zone delen, dan is geen individuele klimaatregeling mogelijk. Zelfs in gebouwen met privé-kantoren is het kenmerkend dat veel van deze kantoren deel uitmaken van dezelfde regelzone.

Als ons doel is om op iedere persoonlijke werkplaats te voorzien in het gewenste klimaat, dan moeten de zones in grootte worden beperkt tot de afmeting van individuele werkplekken (micro-zones). Een commerciële oplossing is het Johnson Controls Personal Environmental Module™ (PEM). Dit bestaat uit een bureau waarin, als één van de aspecten, luchtuitlaten zijn opgenomen met een individueel geregelde temperatuur (binnen grenzen) en luchttoevoer vanuit het centrale luchtbehandelingssysteem. De lucht wordt toegevoerd door flexibele kanalen die onder een verhoogde vloer zijn gemonteerd.

Een andere techniek die in gebruik is, is de individuele controle van het luchtvolume van luchtuitlaten die boven het hoofd worden geplaatst met behulp van VAV (variabel luchtvolume) boxen [6]. De warme of koude lucht wordt toegevoerd door een centraal luchtbehandelingssysteem. De grootte van een dergelijke zone beslaat ongeveer vier kantoorwerkplekken. In sommige gevallen zijn de VAV-boxen ook voorzien van een verwarmingsbat-

terij om de lucht opnieuw elektrisch te verwarmen als de toegevoerde lucht voor sommige kantoorgebieden te koud is. Het laatste is erg inefficiënt voor het energiegebruik.

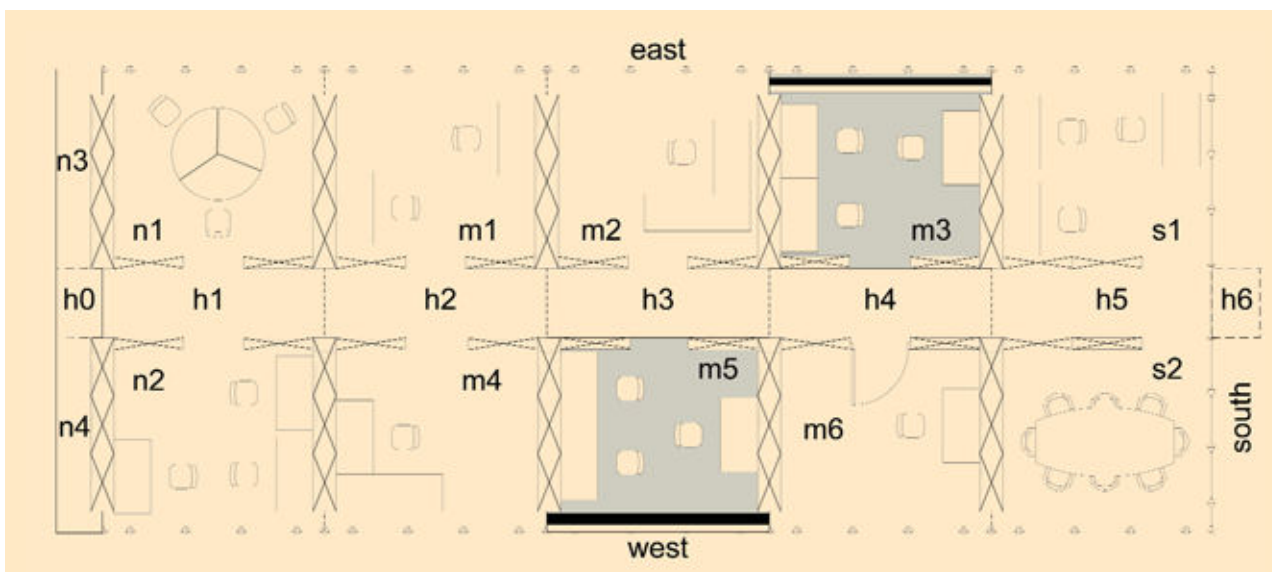
Toevoer van warm en koud water voor de klimaatregeling van kleine zones is een betere optie. Ventilatorconvectoren onder een verhoogde vloer, in het plafond of zelfs hangend onder het plafond (Coolwave™) kunnen afvoer lucht- en waterstromen regelen voor verwarming en koeling van micro-zones. In vochtige klimaten dienen deze systemen te worden aangevuld door centrale ontvochtigingssystemen die ook voorzien in verse lucht, maar met een tiende van de luchtstroming die nodig is voor de klimaatinstallatie. Een derde techniek is gebaseerd op verwarmde of gekoelde stralingspanelen aan wanden of plafonds om de operationele temperatuur t_o aan te passen zonder t_a te veranderen. Toevoer voor deze panelen is typisch warm of koel water dat lokaal kan worden geregeld.

Een eerste vereiste voor al deze technieken zijn lokale regelaars in iedere micro-zone, bij voorkeur met gebruikersinteractie voor het instellen van ET^* en terugkoppeling van de gevolgen van deze instelling naar de gebruiker. Centrale regelaars zijn ook nodig omdat aangrenzende zones in een kantoor met een vrije indeling in grote mate thermisch met elkaar in wisselwerking staan. Deze wisselwerking moet in aanmerking worden genomen en maakt deel uit van ons praktijkonderzoek.

HET PRAKTIJKONDERZOEK

De proefopstelling

Om het mogelijk te maken experimenten te verrichten met concrete resultaten is het "Robert L. Preger Intelligent Workplace" kantoor met een vrije indeling (IW) aan de Carnegie Mellon Universiteit in Pittsburgh gekozen (IW-homepage), gebouwd en gebruikt door het "Centre for Building Performance and Diagnostics" (CBPD). De IWS is een rechthoekige sectie van 25x10 m met ramen aan drie zijdes en open naar de andere gedeelten van de IW. De dakconstructie definieert de ruimte; de lengte van de ruimte is verdeeld in vijf segmenten. Ieder segment is verdeeld in twee werkplekken: één aan de oostelijke en één aan de westelijke raanzijde met een gang ertussen (zie figuur 3). De plafondhoogte is 3 m tussen, en 3 tot 5 m in de kantoorruimten. De afscheiding tussen de ruimtes bestaat uit dossierkasten, boekenplanken, kantoorcheidingswanden van verschillende hoogten, planten en andere elementen. De hoogte van de afscheidingen varieert tussen 1 en 2,5 m. Ruimte s2 is een vergaderruimte, de negen kantoren worden gedeeld door vier faculteitsmedewerkers, vier bezoekers en twaalf studenten. Alle ruimten, behalve de gang, zullen worden uitgerust met ruimtethermostaten die de ventilatorconvectoren onder de verhoogde vloer regelen. Alle ruimtes zijn uitgerust met raamstijlen die verticaal tussen de glasvlakken in lopen en gevuld zijn met water om stralingseffecten van de ramen te compenseren.



Plattegrond van de IWS. De gearceerde ruimtes zijn op het moment uitgerust met ventilatorconvectoren.

- FIGUUR 3 -

id	type	modelling solution
hf1 hf2		Warmtetransport tussen buiten en binnen door wand, gebaseerd op klimaatdata luchttemperatuur, TRNSYS wandmodel
hf3 hf4 hf5	Thermische conductie	Warmtetransport door scheidingsdelen (kantoormeubilair) tussen ruimte en aangrenzende ruimten, gemodelleerd als TRNSYS wanden
hf6		Warmtetransport tussen ruimte en plenum door vloerdelen
hf7	Zonnestraling	Warmtetransport door raamopeningen, stralingsdata verkregen uit klimaatdata, TRNSYS raammodel, geen schaduw
hf8		
hf9 hf10	Luchtuitwisseling	Thermische koppeling door symmetrische luchtuitwisseling bij ruimteluchttemperatuur. Luchtstroming is berekend aan de hand van vergelijking 5.
hs1	Ventilatorconvectoren	Aangestuurd aan de hand van een <i>feedback loop</i> , temperatuur van de ventilatielucht en de luchtstroomhoeveelheid zijn gebaseerd op het bezettingsniveau
hs2	Warmtebronnen	Warmtelasten van warmtebronnen in de ruimte zoals computers, verlichting, personen etc. Zijn gebaseerd op bezettingsdata.

Details van het model.

- TABEL 1 -

Op vochtigheid geregelde verse lucht wordt toegevoerd door een centraal luchtbehandelingsstelsel. Tot dusver functioneren de watergevulde raamstijlen en de centrale luchttoevoer in alle tien de ruimten, daarnaast zijn ventilatorconvectoren geïnstalleerd in twee ruimtes. Deze twee en de aangrenzende ruimtes zijn uitgerust met een netwerk van temperatuursensoren voor kalibratie van het simulatiemodel en voor controle-experimenten.

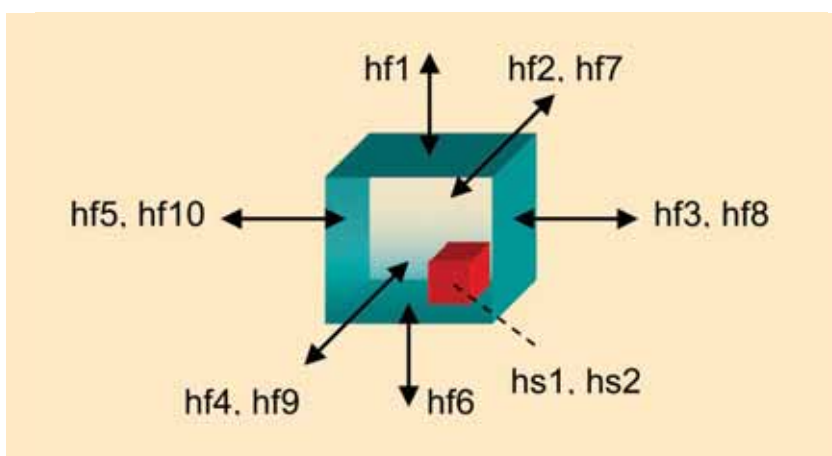
HET GEBOUWMODEL

Het gebouwmodel wordt opgezet met behulp van de simulatie en modellering Studio van het computerprogramma TRNSYS™. Dit systeem

beschikt over een module voor meer-voudige zones in een rechtlijnig 3D raster. In overeenkomst met deze structuur zijn er tien kantoorruimten, vijf gangen en vier aangrenzende ruimten gedefinieerd (n3, n4, h0, h6 in figuur 3). Daarnaast zijn er vijftien plenumruimten onder, en een plat dak op 3 m boven de verhoogde vloer aangebracht. Deze afwijking van de dakstructuur van IWS vereenvoudigt het model. De buitenmuur- en dakelementen zijn opgebouwd uit aluminium/isolatie sandwichpanelen met een dragende staalconstructie aan de binnenzijde. Alle ramen zijn thermopane uitgevoerd. In principe hebben de muren en het dak een lage warmteopslagcapaciteit, echter de staalconstructie

voegt hier een hoge capaciteit aan toe. Als vereenvoudiging is het staalgewicht gemodelleerd als een 11 mm dikke staallaag aan de binnenzijde van het dak. De verhoogde vloertegels boven het plenum zijn gemaakt van beton met een vloerbedekking aan de bovenzijde. Deze tegels voegen ook een grote warmtecapaciteit toe. Dit resulteert, samen met het meubilair in een trage temperatuurrespons. Simulatie-intervallen tot vier dagen zijn gebruikt om een tijdsafhankelijke situatie te realiseren na veranderingen in de warmtestroom.

Figuur 4 laat de warmtestromen hf1 ... hf10 en de interne warmtebronnen hs1 en hs2 van een ruimte van of naar de aangrenzende ruimten zien. De aangrenzende ruimten n3, n4, h0, h6 en de 15 plenumruimten zijn ingesteld op een constante temperatuur. Deze kunnen als experimentele parameters worden gevarieerd. De hoge plenumtemperatuur die werd gemeten, werd veroorzaakt door de verschillende kanalen en leidingen die aanwezig zijn in het plenum. Voor de buitenomgeving is gebruik gemaakt van de standaard klimaatdata van de stad Pittsburgh (USA). Daarnaast zijn er kunstmatige klimaatdata gecreëerd met een constante temperatuur en zonder zonnestraling. Met behulp van de kunstmatige klimaatdata is het mogelijk om resultaten te produceren



Warmtestromen en warmtebronnen van een kantoorruimte.

- FIGUUR 4 -

aan de hand van simulatieperioden die korter zijn dan een jaar. Deze resultaten zijn eenvoudiger te interpreteren. In Tabel 1 is een overzicht weergegeven van de verschillende warmtestromen, bronnen en modellen.

De warmtestromen hf1 tot en met hf7 zijn gebaseerd op standaard modellen en worden volledig ondersteund door TRNSYS. De enige onzekerheid is de warmteweerstand van de meubelelementen die zijn gebruikt als afscheiding tussen de ruimten (hf3 tot en met hf5). In de IWS bestaat een groot aantal verschillende types afscheidingen, deze geven een persoonlijke tint aan iedere ruimte. Omdat deze warmtestromen een kleine rol spelen in de warmte-uitwisseling tussen de ruimten, zijn alle afscheidingen als massieve muren met identieke thermische eigenschappen gemodelleerd.

De grote warmtestromen hf8 tot en met hf10 tussen de ruimten behoeven meer aandacht. In TRNSYS worden de luchtstromingen tussen ruimten *coupling* genoemd met de luchtstroom als parameter. Er wordt aangenomen dat de stromingen symmetrisch zijn. De luchtuitwisseling door openingen hangt af van vele geometrische factoren en andere parameters. In principe zijn hier CFD-simulaties met exacte ruimte- en meubelgeometrieën voor benodigd. Deze zijn echter zeer tijdrovend en gevoelig voor kleine veranderingen in de geanalyseerde ruimte. Op dit punt werden hier grotere afwijkingen geaccepteerd door gebruik te maken van modellen voor de luchtuitwisseling door open ramen in het geval dat er geen winddrukverschillen zijn. Deze modellen gaan uit van stilstaande lucht, en zijn gebaseerd op barometrische drukverschillen die worden veroorzaakt door temperatuurverschillen in de aangrenzende ruimten. Het massatransport \dot{m} in kg/h is berekend aan de hand van [1]:

$$\dot{m} = 4320 \cdot a \cdot eo \cdot (abs(T_i - T_j)^{0.5}) \quad (5)$$

a is een factor die, volgens verschillende publicaties, tussen de 0,005 en 0,01 ligt. Hier wordt aangenomen $a=0,01$ [1], ondanks dat metingen in de IWS een grotere waarde suggereren. Dit komt waarschijnlijk door de luchtbewegingen die worden veroorzaakt door de ventilatorconvectoren. Er zijn echter op dit punt niet genoeg

metingen beschikbaar om een voorstel te doen voor deze waarde. De effectieve opening eo wordt berekend aan de hand van:

$$eo = w \cdot h^{1.5} \quad (6)$$

waarin w de breedte van de opening is in m en h de hoogte van de opening in m.

Als verschillende openingen met verschillende breedtes w_i en hoogtes h_i aanwezig zijn in een deel van de muur, dan kunnen de effectieve openingen worden gesommeerd:

$$eo = \sum_i w_i \cdot h_i^{1.5} \quad (7)$$

T_i en T_j zijn de luchttemperaturen van de verschillende aangrenzende ruimten i en j . De warmtestroom hsI is als ventilatie gemodelleerd met als parameters de luchtuitwisselingsnelheid en de luchttemperatuur. Beiden vallen binnen de grenzen van de specificaties van de gebruikte ventilatorconvectoren en zijn ingesteld aan de hand van een controle algoritme. De luchttemperatuur wordt begrensd door de aanvoertemperaturen van het warme en koude water, in de case studie zijn deze 30 °C en 10 °C. De luchtuitwisselingsnelheid wordt begrensd door de maximale luchtvolume hoeveelheid van de ventilatorconvectoren. In de case studie wordt er uitgegaan van drie ventilatorconvectoren van het type VKB630™ (LTG AG, Stuttgart) per ruimte met een debiet van elk 450 m³/h. Het aantal luchtwisselingen is onder deze waarde vastgesteld op veertien luchtwisselingen per uur.

Het model is een vereenvoudiging omdat het dynamische gedrag van een ventilatorconvector veel complexer is. Het hangt af van de toevoerdruk of -stroom van de pomp, de afmetingen en uitvoering van de toevoerleidingen, de uitvoering van de warmtewisselaars en andere factoren. Voor dit onderzoek zijn dergelijke details van secundair belang, ze dienen echter te worden meegenomen wanneer de resultaten worden vergeleken met meetdata. In TRNSYS zijn verschillende controlemechanismen toegevoegd. In plaats daarvan is gebruik gemaakt van modules genaamd "Vergelijking" om volledige controle te hebben over de algoritmen. Na het proberen van pid en andere controlemechanismen, is er gekozen voor een p-controller met een

boven- en ondergrens en een range voor schommelingen (een range van temperaturen tussen twee instelwaarden) en een p-controller zonder deze range. Om instabiliteit te voorkomen diende de tijdsresolutie van alle simulaties gelijk te worden gesteld aan 0,01 uur. Aan de hand hiervan kunnen de lange simulatietijden die werden ervaren, worden verklaard.

SIMULATIERESULTATEN

Experimenten

Als een simulator van de proefopstelling eenmaal is geïmplementeerd en naar behoren functioneert (geen oscillaties, iteratiefouten, plausibele resultaten), kunnen verschillende experimenten worden verricht om antwoord te geven op vragen over ontwerp, opdracht en onderhoud. De volgende parameters zijn gevarieerd in meer dan 100 experimenten die tot dusver zijn verricht:

1. Klimaatdata

- a: Pittsburghs standaard tmy-klimaatdata, 365 dagen, resolutie 1 uur;
- b: constante buitentemperaturen in stappen van 5 °C, van -20 °C tot 40 °C, elk vier dagen, geen straling;
- c: hetzelfde als b, slechts 1 temperatuur, 30 dagen.

2. Bezettingsdata:

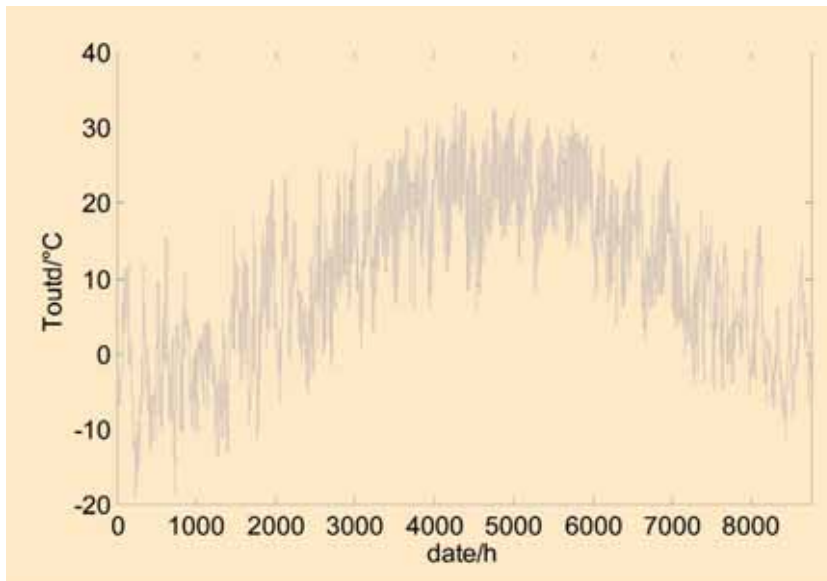
- a: geen ruimten in gebruik gedurende de hele periode;
- b: alle ruimten in gebruik gedurende de hele periode;
- c: de bezettingsgraad neemt toe van 1 tot 10, willekeurige verspreiding;
- d: dynamische bezetting die gegeneerd wordt met de MATLAB-generator (zie paragraaf 3.2), tijdsresolutie is 0,1 h en 0,01 h;
- e: bezetting gegeneerd met de USSU-generator [9].

3. Temperatuurdata en voorkeursinstellingen

- a: comforttemperatuur T_p en de terugsteltemperaturen T_{sb} zijn gelijk voor alle kantoorruimten;
- b: individuele voorkeurstemperaturen T_p en tolerantieranges rt zijn dynamisch toegekend aan de bezettingsgraadpatronen (bezettingsdata 3d).

4. Regelingsalgoritmen

- a: comfort en terugsteltemperatuur ranges, geregeld aan de hand van de bezettingsgraad, de luchttemperatuur is niet geregeld wanneer



Buitentemperatuur in Pittsburgh, verkregen uit de standaard klimaatdata.

- FIGUUR 5 -

Exp	Parameter vector	ET* range	Energie
		°C	MWh/j
1.1	1a, 2b, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	22-23	39,48
1.2	1a, 2a, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	17-28	14,21
1.3	1a, 2b, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	20-25	26,74
1.4	1a, 2a, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	15-30	8,58
1.5	1b, 2b, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	20-25	26,46
1.6	1b, 2a, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	15-30	8,86

Grenzen van het energiegebruik.

- TABEL 2 -

- deze binnen de range ligt;
- b: gelijk aan a, echter geen comfort-regeling range.
5. Hoogte van de scheidingsdelen (koppelfactoren)
- a: 0, 1, 2, 3 m, open doorgang naar de gangen;
- b: 3 m (plafondhoogte), deur naar gangen, gelijk aan gesloten kantoren.
6. Thermische ruimtecapaciteiten
- a: gelijk aan de werkelijke IWS;
- b: het gewicht van het dragend staal gereduceerd naar nul, vloer zwaar geïsoleerd, het gewicht van het meubilair gereduceerd.

Aan de hand van de bovengenoemde variabelen kan een groot aantal vragen worden beantwoord. De experimenten dienen zorgvuldig te worden gepland en geanalyseerd om significante ant-

woorden te vinden binnen een redelijk tijdsbestek. Vooral de experimenten waarbij gebruik wordt gemaakt van de klimaatdata 1a hebben meer dan 10 uur nodig op een 850 MHz PC.

In dit artikel worden er enkele typerende experimenten gepresenteerd, andere kunnen worden gevonden in [11]. De navolgende tabellen duiden de selectie van de parameterinstellingen aan door een parametervector die is samengesteld uit de letters en cijfers uit het voorgaande overzicht. Figuur 5 laat de buitentemperatuur van een standaard jaar in Pittsburgh (USA) zien. Deze bestaat uit een grote range van koud en warm weer. Bovendien voegt de zonnestraling een grote thermische warmtelast toe. Dit profiel wordt als een goede test beschouwd voor het model en de simulatie.

Het TRNSYS-model staat de toevoeging van meerdere parameters toe, zoals: extra thermische warmtelasten van personen en apparatuur, temperatuurveranderingen in de plenumruimte of een regeling van de vochtigheid. Verticale zonwering is mogelijk, deze wordt geregeld door een regelingsalgoritme. Deze parameters zijn niet gebruikt voor de simulaties, omdat deze de interpretatie van de resultaten zouden compliceren.

Experiment 1: Boven- en ondergrenzen van de energie

Als meest ongunstige scenario voor het energiegebruik kan de situatie worden aangenomen waarin alle ruimten gedurende de gehele tijd worden geregeld op comforttemperaturen. Deze situatie kan zich voordoen wanneer de bezetting is verspreid over 24 uren gedurende zeven dagen per week. Aan de andere kant wordt het laagst mogelijk energiegebruik bereikt wanneer de nachttemperaturen de gehele tijd worden aangehouden. Het doel van een goede regelingsstrategie is om zo dicht mogelijk bij de ondergrens van het energiegebruik te komen en gelijktijdig het individueel comfort te waarborgen. Het slechtste scenario kan worden verbeterd wanneer de comfortrange wordt uitgebreid. Tabel 2 geeft de resultaten weer van de vijf cases.

Exp1.1 en Exp1.2 laten het energiegebruik van de gehele IWS zien voor een geregelde temperatuurrange van 1 °C wanneer het gedurende de gehele periode bezet is, en voor een uitgebreide nachttemperatuurrange van 11 °C wanneer het niet bezet is. Beide energiewaarden zijn veel groter dan bij Exp1.3 en Exp1.4 waarbij de ranges zijn uitgebreid met 4 °C. Natuurlijk geventileerde gebouwen laten zien dat de gebruikers tevreden kunnen zijn bij dergelijk grote ranges. In praktijk zal de grote range resulteren in temperaturen die gedurende het koude seizoen dichtbij de ondergrens liggen en gedurende het warme seizoen dichtbij de bovengrens. Gedurende de herfst en de lente zullen de temperaturen variëren. Exp1.5 en Exp1.6 vertonen vergelijkbare energiefiguren voor dezelfde ranges, echter met een veel eenvoudiger klimaatbestand 1b. De aanzienlijke simulatietijd kan worden gereduceerd,

Exp	Parameter vector	Bezettings-niveau	Energie/ MWh/jaar	
			T_{buiten}	
			-10 °C	+40 °C
2.1	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	10	52,14	31,06
2.2	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	9	51,05	30,33
2.3	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	8	48,69	28,53
2.4	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	7	48,22	28,18
2.5	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	6	45,65	27,08
2.6	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	5	41,63	24,60
2.7	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	4	39,29	23,26
2.8	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	3	37,33	21,63
2.9	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	2	31,32	17,03
2.10	1c, 2c, 3a, 4a, 5a(2m), 6a	1	24,41	7,53

Energiegebruik als functie van de bezettingsgraad, T_p range: 20-25 °C, T_{sb} range: 15-30 °C.

- TABEL 3 -

hp	0m		1m		2m		3m	
T_{buiten}	occ1	occ9	occ1	occ9	occ1	occ9	occ1	occ9
-10 °C	2,21	0,80	2,77	1,12	3,55	1,80	4,76	3,31
5 °C	0,90	0,34	1,11	0,45	1,54	0,70	2,26	1,19
40 °C	1,56	0,75	2,00	0,84	2,82	1,37	4,31	2,41

Mogelijke temperatuurverschillen in °C tussen aangrenzende kantoren zonder parallelle verwarming en koeling.

- TABEL 4 -

echter een nadeel is dat er met dit klimaatbestand geen rekening wordt gehouden met zonnestraling.

Experiment 2: Bezettingsgraad

Een van de mogelijkheden om energie te besparen is het regelen van de comforttemperaturen aan de hand van de bezetting. Het is duidelijk dat dit in een kantoor met een vrije indeling slechts in bepaalde mate mogelijk is. In tabel 3 zijn de resultaten weergegeven voor twee constante temperaturen en voor een scheidingsgedeelte met een hoogte van 2 m (om een indruk te geven). Door de sterke thermische koppeling tussen de aangrenzende ruimten hangen de resultaten ook af van de verdeling van bezette en onbezette kantoren.

Tabel 3 laat duidelijk zien dat in het geval van de IWS de energiebesparing significant is wanneer het bezettingsniveau beneden de 60 % ligt. Dergelijke niveaus zijn gemeten door [8] en kunnen als typerend worden aangenomen voor organisaties met flexibele werktijden. Andere experimenten laten zien, zoals ook aangenomen wordt, dat de energiebesparing toeneemt met de hoogte van de scheidingsdelen. Experiment 3 analyseert dit nader in detail.

Experiment 3: Hoogten van scheidingsdelen

In kantoren met een vrije indeling worden scheidingsmuren of -meubilair meestal gebruikt als optische of akoestische afscheiding van de werkruimten. In het kader van het instellen

van een individuele comforttemperatuur worden afscheidingsmuren gebruikt voor het reduceren van de thermische koppeling met de aangrenzende ruimten. Zoals uitgelegd in paragraaf 5.2 is de koppeling voornamelijk het resultaat van de luchtuitwisseling door de openingen boven de afscheidingen. Experiment 3 analyseert de mogelijke temperatuurverschillen tussen bezette en onbezette kantoren als middel voor energiebesparing. Daarnaast wordt dit experiment verricht om inzicht te krijgen in de grenzen van handhaving van verschillende comforttemperaturen in aangrenzende kantooruimten die worden veroorzaakt door verschillende voorkeurstemperaturen zonder dat het ene vertrek wordt verwarmd en het andere gekoeld op hetzelfde tijdstip. Experiment 4 laat zien dat alle temperatuurverschillen mogelijk zijn door dit laatste te doen, echter met een hoger energiegebruik als nadeel. Tabel 4 geeft enkele resultaten weer voor extreme situaties van een bezet kantoor tussen de resterende onbezette kantoren (occ1) en een onbezet kantoor tussen de resterende bezette kantoren (occ9). De hoogte van de scheidingsdelen wordt aangegeven met hp .

De waarden in tabel 4 tonen aan dat in de aangrenzende kantoren geen grote temperatuurverschillen gehandhaafd kunnen worden wanneer de prioriteit bij energiebesparing ligt. De mogelijke verschillen stijgen wanneer, zoals ook werd aangenomen, de hoogte van de scheidingsdelen toeneemt. Een hoogte van 3 m benadert een individueel kantoor, maar kan niet langer worden gezien als een kantoor met een vrije indeling. $hp=2$ m lijkt hier een goed compromis.

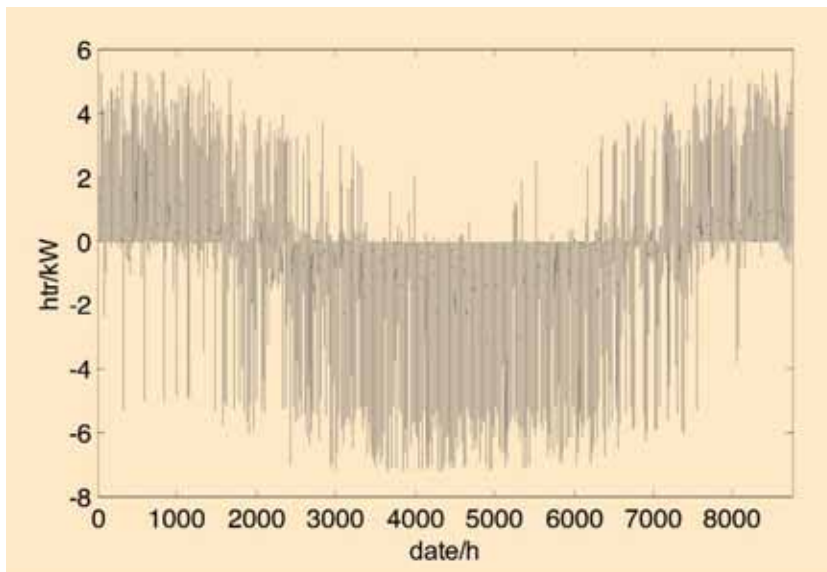
Experiment 4: Tevredenheidsstudie

In Experiment 4 worden individuele voorkeurstemperaturen T_p geïntroduceerd binnen een range van 20-25 °C met een distributie die dicht bij de resultaten in figuur 2 ligt in de ok categorie. De uitzonderingen zijn Exp4.2 en Exp4.3, met $T_p=22,5$ °C voor alle ruimten. Alle tolerantieranges rt zijn gelijk gesteld aan 1 °C. Voor het verkrijgen van hoge tevredenheidsniveaus is het gelijktijdig verwarmen en koelen van aangrenzende kantoren toegestaan. De parametervector is: (1a, 2d, 3b, 4b, 5a, 6a+b).

Exp	Therm cap.	hp	Energie	Ewarme	Ekoude	satA	satT
		m	MWh/j	MWh/j	MWh/j		%
4.1	6a	2	29,70	9,08	20,62	0,83	97
4.2	6a	2	28,04	7,77	20,27	0,37	49
4.3	6a	2	28,04	7,77	20,27	0,87	98
4.4	6b	0	40,16	13,82	26,34	0,70	89
4.5	6b	2	34,84	11,18	23,66	0,80	95
4.6	6b	3	32,96	10,20	22,76	0,85	98

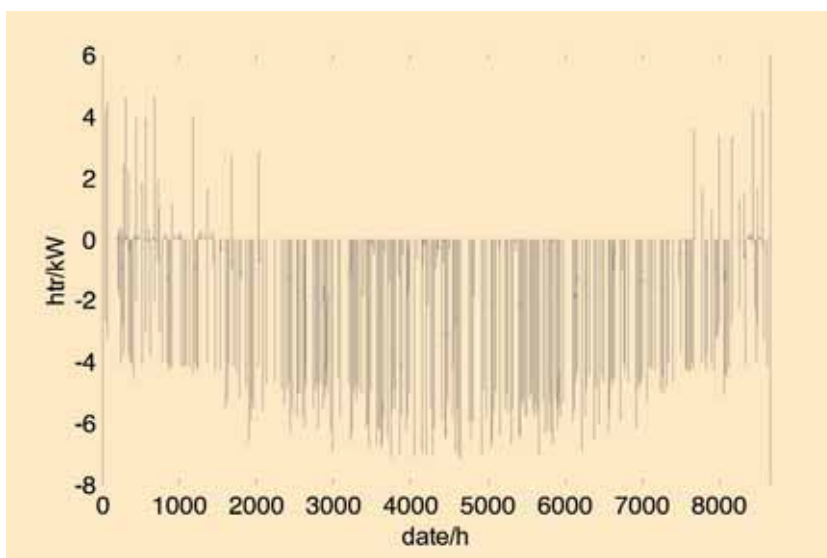
Energiegebruik en tevredenheidsresultaten.

- TABEL 5 -



Warmtetransporthoeveelheid (htr) die door de ventilatorconvectoren in ruimte m3 in beweging wordt gebracht.

- FIGUUR 6 -



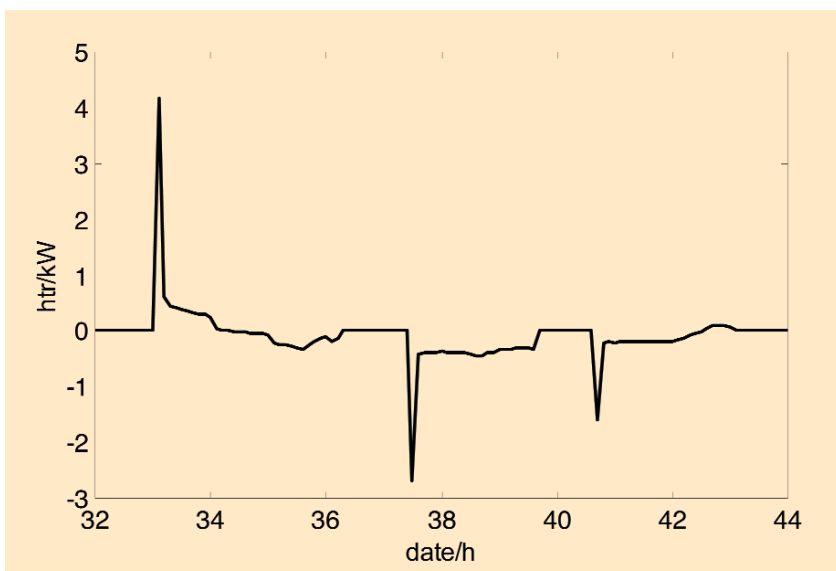
Warmtetransporthoeveelheid (htr) die door de ventilatorconvectoren in ruimte m2 in beweging wordt gebracht.

- FIGUUR 7 -

Deze tabel heeft een gedetailleerde interpretatie. In Exp4.1 tot en met Exp4.3 is de thermische capaciteit net zo hoog als in de werkelijke IWS. In de laatste drie cases is deze gereduceerd waarbij aangenomen is dat een lagere capaciteit door de kortere responstijden beter is voor de tevredenheid. Daarnaast is aangenomen dat het energiegebruik afneemt door kortere tijden die nodig zijn om terug te keren naar de terugsteltemperatuur. Exp4.1 laat een totaal energiegebruik zien van 29,7 MWh/j. In vergelijking met de waarde van 39,5 MWh/j die in het slechtste scenario in Exp1.1 is gevonden, kan hier een aanzienlijke besparing worden gerealiseerd door het regelen van de temperatuurinstellingen op bezettingsniveau. De totale energie is de som van het energiegebruik voor verwarmen (*Eheat*) en koelen (*Ecool*). Door de grote zonnestraling en de aanname dat er geen zonwering aanwezig is, is de koelcomponent veel groter dan de verwarmingsenergie. Dit duidt het belang van zonwering aan, zoals toegepast in de IWS maar hier niet gemodelleerd. Beide tevredenheidsniveaus, satA en satT laten hoge waarden zien.

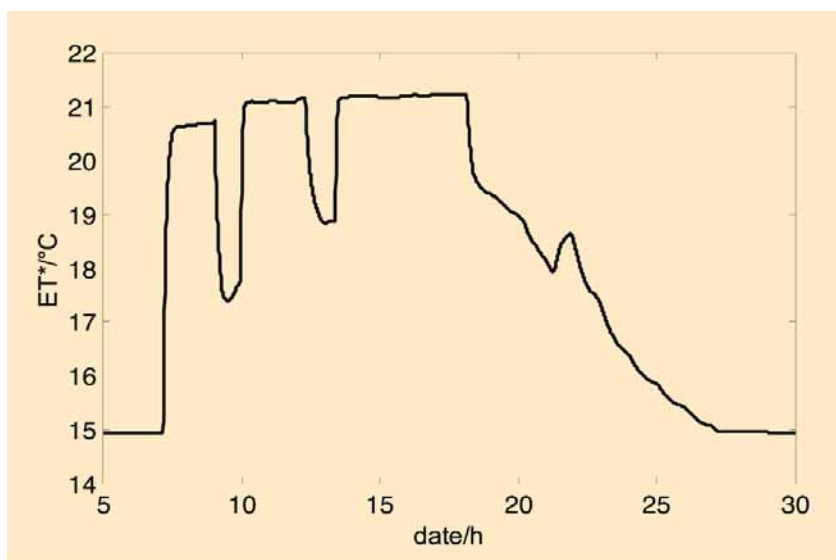
In Exp4.2 en Exp4.3 is de voorkeurstemperatuur T_p veranderd in dezelfde temperatuur voor alle gebruikers, zodat kan worden geanalyseerd wat het verschil kost. De energiereductie is slechts 6 %, maar als aangenomen wordt (Exp4.2) dat de voorkeurstemperaturen nog steeds in dezelfde range vallen als bij Exp4.1, dan zijn de tevredenheidsresultaten onacceptabel. Dit ondersteunt de bevindingen uit praktijkstudies dat de tevredenheidsniveaus laag zijn in kantoren met een uniforme temperatuur. Alleen wanneer aangenomen wordt dat alle gebruikers een voorkeur hebben voor dezelfde temperatuur (Exp4.3), zijn de resultaten acceptabel.

Exp4.5 kan direct worden vergeleken met Exp4.1, alleen de thermische capaciteit is gereduceerd. De verwachte winst in tevredenheid werd niet gerealiseerd en het energiegebruik nam aanzienlijk toe, in plaats van dat het afnam. Dit is een goed voorbeeld van hoe belangrijk simulaties zijn voor het bewijzen of tegenspreken van onze aannamen. Het verrichten van daadwerkelijke experimenten met verschil-



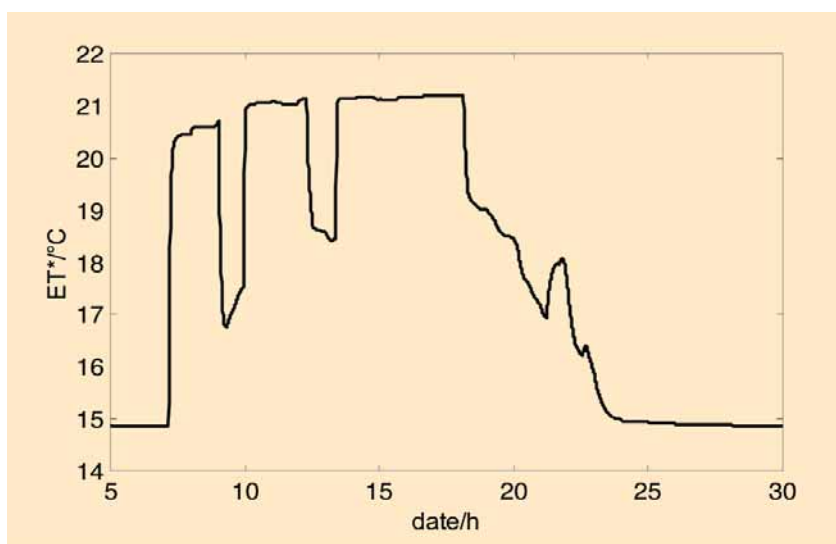
Een detail uit figuur 7.

- FIGUUR 8 -



Temperatuurveranderingen in ruimte m2 met een hoge thermische capaciteit.

- FIGUUR 9 -



Temperatuurveranderingen in ruimte m2 met een gereduceerde thermische capaciteit.

- FIGUUR 10 -

lende capaciteiten zou onmogelijk zijn geweest.

Exp4.4 en Exp4.6 ondersteunen het belang van de hoogte van de scheidingsdelen. In de situatie waarin geen scheidingsdelen ($hp=0m$) aanwezig zijn is significant meer energie benodigd. Ook resulteert dit in een lager tevredenheidsniveau dan wanneer scheidingsdelen van 2 m hoog aanwezig zijn, zoals ook weergegeven is in tabel 4.

Figuren 6 en 7 laten zien waarom zelfs gedurende het koude seizoen koeling benodigd is voor het behouden van de verschillende comforttemperaturen in aangrenzende kantoren. De gebruikers in ruimte m2 vragen een temperatuur $T_p=23,5$ °C, en de gebruikers in ruimte 2 m vragen een temperatuur $T_p=20$ °C. Wanneer m2 op comforttemperatuur is, dan is in m3 koeling benodigd in de winter zoals ook weergegeven in Figuur 7. Ruimte m2 (figuur 6) heeft echter voornamelijk verwarming gedurende het koude seizoen en koeling gedurende het warme seizoen, zoals ook wordt verwacht. Sommige uitzonderingen worden veroorzaakt door zonnestraling.

Wanneer er met een hogere tijdsresolutie gekeken wordt naar ruimte m2 op dag 2 van het jaar, dan blijkt dat er een hoge piek in de warmtestroom van de ventilatorconvactor aanwezig is gedurende de ochtend als de ruimte in gebruik wordt genomen. Daarnaast is een piek in de koeling waar te nemen na een korte onbezette periode. Zoals in Experiment 5 te zien zal zijn, maken dergelijke pieken een relatief korte responstijd mogelijk op temperatuurveranderingen. In werkelijkheid zijn dergelijke pieken mogelijk als niet alle ruimten zoveel vermogen nodig hebben op hetzelfde tijdstip. Dit is een voordeel van onregelmatige werktijden van individuen. Voor de ventilatorconvectoren betekent een piek volledig vermogen van water en luchtstroom voor een korte tijd. Het resulterende geluidsniveau dient te worden getolereerd, anders worden langere responstijden verwacht.

Experiment 5: Responsietijden

Een van de problemen van het regelen van de verwarming en koeling op de bezetting, is de trage responstijd van vele systemen. Indien de nachttempe-

	Gerealiseerd temperatuur verschil m.b.t. eindwaarde	taan		tuit	
		0,5 °C	1 °C	0,5 °C	1 °C
Exp	Parameter vector	min	min	uren	uren
5.1	1c(-10 °C), 2d, 3b, 4b, 5a, 6a	14	10	7,3	6,3
5.2	1c(-10 °C), 2d, 3b, 4b, 5a, 6b	8	5	5,0	4,5

Responsietijden gedurende de verwarmingsperiode.

- TABEL 6 -

ratuur in grote mate verschilt van de comfortwaarden, hetgeen wenselijk is voor energiebesparing, dan resulteert een grote vertraging in het bereiken van de comforttemperaturen in tevredenheidsproblemen. Daarom is het van belang om de tijd te analyseren die benodigd is voor het bereiken van de comfortwaarden. De tijd die benodigd is voor het bereiken van de nachttemperatuurwaarden na bezetting is ook van belang voor energiebesparing, en dient eveneens kort te zijn. Beide tijden kunnen significant verschillend zijn, omdat eerst de temperatuur van de lucht in de ruimte verandert als de verwarming of koeling wordt aangezet en daarna pas de temperatuur van de thermische massa. Wanneer deze worden uitgezet dan bepalen de grotere massa's de temperatuurverandering.

Experiment 5 analyseert de tijd die benodigd is om van de nachttemperatuur te switchen naar de comforttemperatuur (*ton*) en omgekeerd (*toff*) voor hoge en lage thermische capaciteiten in de ruimten. Figuur 9 laat duidelijk zien dat *ton* veel korter is dan *toff*. Dit kan worden verklaard aan de hand van de regelstrategie. Ondanks dat het belangrijk is om actief te reageren door het toevoegen van warmte of koude door de ventilatorconvectoren wanneer bezetting waargenomen, kan de energietoevoer worden uitgezet totdat de grenzen van de nachttemperatuurrange zijn bereikt wanneer er geen bezetting meer is. De twee terugstelmomenten in de orde-grootte van een uur in de periode waarin de ruimte bezet is zijn te wijten aan de momenten waarop alle gebruikers de ruimten verlaten voor vergaderingen, cursussen of voor de lunch. De fluctuaties gedurende de *toff* periode

kunnen worden verklaard aan de hand van de temperatuurveranderingen in de aangrenzende kantoren; deze beïnvloeden de geobserveerde ruimte door thermische koppeling. In tabel 6 zijn enkele resultaten weergegeven.

Ondanks de reductie van de thermische capaciteit in de kantoorruimten zijn *ton* en *toff* niet sterk gereduceerd. Dit is een ander geval waarin simulatie belangrijk is, omdat een gezond verstand een grotere invloed zou verwachten. In beide situaties dient *ton* kort genoeg te zijn, zodat aan het begin geen discomfort optreedt. Dit dient te worden geanalyseerd aan de hand van praktijkonderzoeken. Het is wellicht ook kort genoeg om onmiddellijk terug te keren naar de nachttemperatuur wanneer de ruimte niet meer in gebruik is. Het lijkt niet noodzakelijk om een regelstrategie te gebruiken met een vertraagde respons. Er is een aantal onzekerheden verbonden aan de waarden in tabel 6. De belangrijkste is het vereenvoudigde model van de ventilatorconvectoren, zoals ook uitgelegd in paragraaf 5.2. Een andere onzekerheid is de aanname dat het volledige luchtvolume, inclusief de thermische massa's van het meubilair, de temperatuur uniform verandert. Dit is niet de realiteit en hangt sterk af van de luchtstroom die door de ventilatorconvector de ruimte in wordt gebracht. Dit dient in de werkelijkheid te worden gemeten of bepaald met erg gedetailleerde CFD-simulaties.

Daarnaast zijn er mogelijkheden om, indien noodzakelijk, de reactietijd te reduceren. Voorspellende regelingsalgoritmen gebaseerd op het verleden van het gebruikerspatroon kunnen worden toegepast om de nachttemperatuur dynamisch te regelen. De ener-

giekosten van dergelijke strategieën dienen te worden geanalyseerd en vergeleken met het gewonnen tevredenheidsvoordeel.

CONCLUSIE


De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat een meervoudig zonemodel van kantoren met een vrije indeling met plausibele warmtetransportvergelijkingen kan worden opgezet voor het modelleren van de luchtstroom tussen twee aangrenzende ruimten, die worden opgedeeld door scheidingsdelen van verschillende hoogten. Het model neemt tevens aparte regelaars voor iedere ruimte mee die reageren op het dynamisch ruimtegebruik en de thermische voorkeuren. Tot slot neemt het model de HVAC-installatie mee die wordt geregeld door de ruimtethermostaten. Samenvattend integreert het model vijf domeinen: de gebouwconstructie inclusief de interne indeling, de apparatuurvoorzieningen, de regelaars en algoritmen, de werkplekken, en enkele dynamische kenmerken van de kantoormedewerkers.

Het model kon gedeeltelijk, met enige moeite, worden geïmplementeerd in de commerciële simulatieomgeving TRNSYS. Het model van de kantoormedewerkers is geïmplementeerd in MATLAB. Ervaring laat zien dat het natuurlijker en makkelijker zou zijn om het complete model te implementeren in een zogenoemde multi-agent technologie. Dit is het volgende doel van dit onderzoek. Een simulatie van een volledig jaar kostte ongeveer 10 uur rekentijd op een 850 MHz processor. Er wordt verwacht dat de agent-gebaseerde versie sneller zal zijn. Ondanks dat het model nog niet gevalideerd is met metingen, kunnen de simulatieresultaten als trend worden geïnterpreteerd. Na her-analyse van gepubliceerde praktijkonderzoeken over de tevredenheid van gebruikers in kantoorruimten met een vrije indeling, werd duidelijk dat hoge tevredenheidsniveaus alleen kunnen worden gerealiseerd als de gebruikers hun thermische omgeving kunnen regelen. De belangrijkste conclusie die kan worden afgeleid uit de simulaties is dat individuele voorkeurstemperaturen mogelijk zijn in combinatie met een redelijk energiegebruik, als een dynamisch regelmechanisme wordt gerealiseerd

gebaseerd op de gebruikers. Een voorwaarde hiervoor is een verwarmings- en koelsysteem dat gebaseerd is op de ruimte en dat de luchttemperatuur snel genoeg kan veranderen, zodat oncomfortabele trage reactietijden worden voorkomen. Een ventilator-convectoren voldoet aan deze vereisten. Voornamelijk in organisaties met flexibele werktijden, zoals in universiteitskantoren en laboratoria, kunnen kantoren met een vrije indeling benodigd zijn om gedurende de gehele periode te voldoen aan comforttemperaturen. In het ergste geval kunnen de microzones niet afzonderlijk worden geregeld. De resultaten laten zien dat microzonering met een gebruikersgebaseerde regeling een significante energiebesparing kan opleveren, zelfs wanneer in de aangrenzende ruimten verschillende temperaturen worden gevraagd ten koste van gedeeltelijke koeling gedurende het stookseizoen en vice versa.

Er kan meer energie worden bespaard wanneer de tolerantieranges van de individuen worden vergroot. [3] trokken de conclusie dat deze ranges voornamelijk een resultaat zijn van verwachtingen, en niet zozeer van de daadwerkelijke behoeften. In natuurlijk geventileerde gebouwen zijn deze ranges veel groter dan in geklimatiseerde gebouwen. In deze context dienen nog steeds veel vragen te worden beantwoord. Een van deze vragen is: kunnen we data van praktijkstudies gebruiken voor het voorspellen van voorkeuren, of laten deze alleen zien dat individuen bereid zijn om een bepaalde omgeving te accepteren? Hoe zouden zij reageren in een ruimte die zij individueel kunnen beïnvloeden? Kan een dynamische feedback van de consequenties van hun regeling leiden tot bredere tolerantieranges en een beter energiegebruik zonder afname van het tevredenheidsniveau? Er dienen meerdere praktijkonderzoeken in kantoren met een vrije indeling te worden verricht om deze vragen te kunnen beantwoorden.

Wij hopen dat dit artikel andere groepen aanmoedigt om praktijkonderzoeken te verrichten die helpen om bovenstaande vragen te beantwoorden. Daarnaast willen wij onze dank uiten richting het Centre for Building Performance and Diagnostics (CPBD) op het CMU, Pittsburgh, USA voor de ondersteuning en voor het feit dat ik

de IW als proefopstelling mocht gebruiken voor de metingen en simulaties en voor het beschikbaar stellen van de benodigde data en informatie. Daarnaast ben ik de leden van het CPBD dankbaar voor de vele constructieve discussies die ik met hen heb gehad. 

REFERENTIES

1. ASHRAE, 2001 Handbook CD, *Fundamentals*, Chapter F08. Thermal Comfort.
2. *ASHRAE-rp884*, http://aws.mq.edu.au/rp-884/ashrae_rp884_home.html
3. de Dear, R., G. et al. 1997. *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preferences*, final report ASHRAE rp-884. http://aws.mq.edu.au/rp-884/ashrae_rp884_home.html
4. Fanger, P.O. 1970, *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill Book Company, New York.
5. *IW-homepage*, <http://www.arc.cmu.edu/cbpd/iw/index.html>
6. Jelsma, J. et al. 2002. *SMART Work Package 4.2*, <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2002/c02094.pdf>
7. Larnbeva, L. & Mahdavi, A. 2007. *User Control of Indoor-environmental Conditions in Buildings: an Empirical Case Study*. Proceedings Building Simulation 2007, Beijing, China: 765-771
8. Mohammadi et al., 2007. *Modeling User Control of Lighting and Shading Devices in Office Buildings: An Empirical Case Study*. Proceedings Building Simulation 2007, Beijing, China, 772-778.
9. Tabak, V. 2008. *User Simulation of Space Utilization*. PhD thesis, Department of Architecture, Building and Planning, Technical University of Eindhoven, the Netherlands
10. Zimmermann, G. 2007. *Modeling and Simulation of Individual User Behavior for Building Performance Predictions*. Proc. 2007 Summer Computer Simulation Conference, San Diego, USA
11. Zimmermann, G. 2008. *Individual Comfort in Open-Plan Offices*. Proceedings DDSS2008, Eindhoven, Netherlands