

Een analyse-tool voor commissioning van gebouwen

Met het toepassen van commissioning in bestaande gebouwen is aangetoond dat het een veelbelovende methode is voor de reductie van het energieverbruik in bestaande gebouwen. Een recent rapport over de baten van commissioning is op basis van gegevens van 561 bestaande gebouwen, die in totaal 8,3 miljoen m² bruto vloeroppervlak beslaan. Dit rapport bevat een analyse van de gemiddelde baten van commissioning. Uit de analyse blijkt dat de mediaan van de gemiddelde jaarlijkse besparing per gebouw 16 % bedroeg [1].

J.M. (Jonathan) Curtin M.Sc., Wylie Consulting Engineers; prof.dr. D.E. (David) Claridge, J.D. (John) Bynum M.Sc, PhD, Texas A&M University
Bewerkt door: H.C. (Henk) Peitsman, B.Sc., TNO Built Environment and Geosciences

Helaas zijn er aanwijzingen dat, nadat de commissioning-activiteiten zijn afgerond, in de periode daarna (post-commissioning), deze besparingen aanzienlijk kunnen teruglopen. Het rapport constateerde op basis van een beperkte hoeveelheid informatie dat de besparingen tijdens de eerste drie tot vijf jaar na commissioning constant blijven. Dit is in strijd met een andere studie waarin specifiek het blijvende karakter van de besparingen werd geanalyseerd. Deze studie bestond uit een inspectie/onderzoek van tien universiteitsgebouwen en meldde een gemiddelde toename van het totale energieverbruik per gebouw voor zowel koeling als verwarming van 12,1 % tijdens de eerste twee jaar nadat commissioning was uitgevoerd [2].

■ FOUT/STORING/AFWIJKING

Een fout/storing wordt gedefinieerd als een onacceptabele afwijking van het normale gedrag, die het onmogelijk maakt het gestelde doel te verwezenlijken. Het detecteren van een fout/storing vindt plaats in een proces van continu meten ('monitoren') en bepalen of

de meetwaarde bepaalde tolerantiegrenzen heeft overschreden. Deze definities houden in dat het normale gedrag en die tolerantiegrenzen van tevoren bekend moeten zijn. De volgende stap in het proces is het lokaliseren van de storing en de oorzaak ervan opsporen. Foutdetectie en Diagnose (FDD) bestaat dus uit (i) het vaststellen van de normale waarden van de te meten grootheden, (ii) het continu meten ervan, (iii) het constateren van ontoelaatbare afwijkingen en (iv) het lokaliseren van fouten/storingen en (v) het opsporen van de oorzaken ervan. FDD is op vergelijkbare wijze gedefinieerd door Iserman [3] en Hyvarinen e. a. [4].

De tegenwoordig algemeen toegepaste Direct Digital Control (DDC) systemen in nieuwe gebouwen, gecombineerd met steeds betrouwbaarder sensoren, hebben de bruikbaarheid van FDD in de HVAC-industrie aanzienlijk vergroot. Ondanks deze ontwikkeling is de acceptatie en de implementatie van geavanceerde FDD-systemen nog niet algemeen toegepast. Dit is mede vanwege de specifieke aard van geavanceerde, op

DDC gebaseerde FDD-systemen evenals de daaraan verbonden kosten. Het vereist ook een bepaalde expertise om die FDD-systemen te implementeren. De FDD-methoden voor de bepaling van het correcte systeemgedrag omvatten op fysische grondbeginselen gebaseerde modellen, ook wel "first principle" modellen genoemd, die zijn gebaseerd op fysische wetmatigheden en gebruik maken van statistische regressie van meetwaarden van ingangs- en uitgangsgrootheden of van kunstmatige neurale netwerken (Artificial NN's); ofwel op 'als-dan' regels gebaseerde expert-systemen of op analyse van basisprincipes. De in ABCAT gebruikte methode is op een model gebaseerd, dus laatst genoemde methoden zullen hier niet worden besproken.

■ MODELGEBASEERDE DIAGNOSE

Voor model-gebaseerde methoden zijn er twee soorten FDD. Deze staan bekend als 'bottom up' methode en 'top down' methode [4].

Bottom-up

De 'bottom up' aanpak gaat uit van compo-

nenten of subsystemen en de beschikbaarheid van grote hoeveelheden gedetailleerde informatie en is dus het best te combineren met DDC-systemen. Gegeven de beperkte focus van deze aanpak, is het diagnosticeren van geconstateerde storingen op componentniveau vaak eenvoudig, maar de moeilijkheid zit vaak in het onderscheiden van fouten/afwijkingen/storingen die tegelijk optreden. De effecten van storingen op globaal systeemniveau zijn vaak moeilijker te vinden [5].

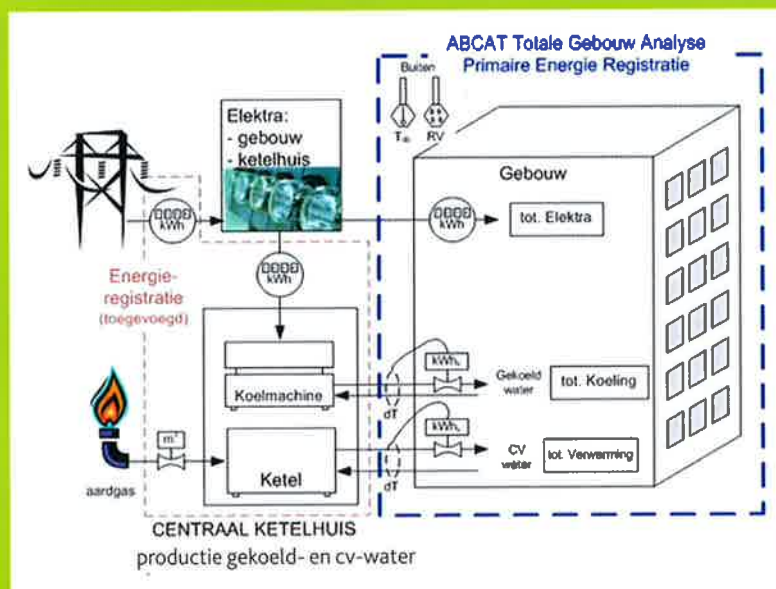
Top-down

De 'top down' benadering gaat uit van een analyse van het hele gebouw, die in het algemeen veel minder informatie nodig heeft over beheer en bediening en kan worden uitgevoerd ongeacht de beschikbaarheid van een DDC-systeem. Hierdoor is gedetailleerde diagnostiek moeilijker, maar het effect van een fout/afwijkingstoring op het systeem als geheel wordt wel duidelijk [4].

Gegeven de behoefte aan een goedkoop geautomatiseerd en gebruiksvriendelijk FDD-systeem dat eenvoudig is te implementeren, lijkt een 'top down' benadering de meest bruikbare, ook om de benodigdheden voor dataverwerking bescheiden te houden. De modellen voor model-gebaseerde FDD methoden kunnen worden onderverdeeld in zg. 'data gedreven' en op zg. 'fysische grondbeginselen gedreven'. De 'data gedreven' methode worden wel aangeduid als "black box" methoden, waarin een empirisch verband wordt gelegd tussen ingangs- en uitgangsvariabelen van het model. De 'fysische grondbeginselen gedreven' methoden worden wel aangeduid als "white box" methoden, waarin de fysische wetmatigheden een rol spelen. Deze modellen kunnen eenvoudig of complex zijn, al naar gelang de complexiteit en reikwijdte van het wiskundige model. Geavanceerde modellen, als Energy Plus, hebben in het algemeen veel data-invoer nodig en zijn daardoor moeilijk te kalibreren. Echter hebben vereenvoudigde modellen, gebaseerd op fysische grondbeginselen, zoals de Simplified Energy Analysis Procedure (SEAP) die is ontwikkeld door Knebel, [6] minder invoer nodig en zijn dus makkelijker te kalibreren [7].

De voordelen van een globale FDD-methodologie op gebouwniveau hebben geleid tot de ontwikkeling van een aantal FDD-tools, waarvan drie in het bijzonder een ontwikkeling hebben doorgemaakt en tests hebben ondergaan, t.w.:

- performance And Continuous Re-commissioning Analysis Tool (PACRAT) (Prestatie-analyse en continue recommissioning analyse tool), ontwikkeld door Facility Dynamics Engineering;



-Figuur 1- Vereiste energiegebruiksmetingen t.b.v. ABCAT.

- de Whole Building Diagnostician (WBD) (Diagnostiek voor een gebouw als geheel), ontwikkeld onder supervisie van het Pacific Northwest National Laboratory;
- de Automated Building Commissioning Analysis Tool (ABCAT) (Geautomatiseerde Analyse-tool voor Commissioning van gebouwen) ontwikkeld aan de Texas A&M University.

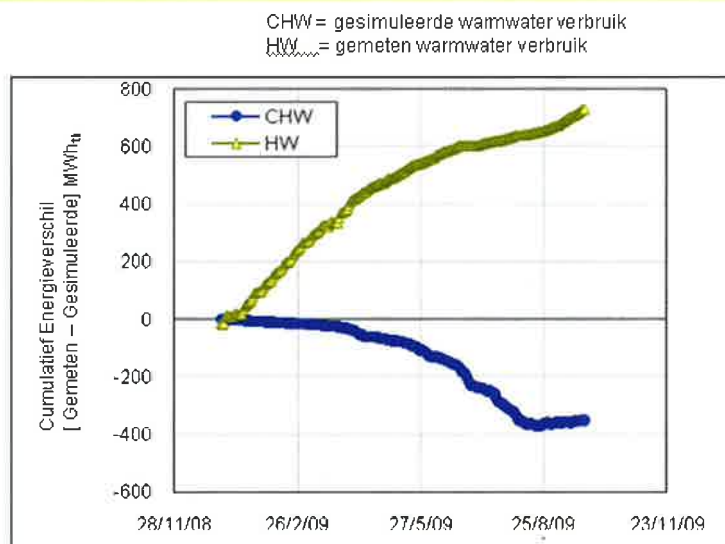
PACRAT en WBD gebruiken beide een multivariabele classificeringsmethode om het energiegebruik te voorspellen, een 'black box' methode dus. PACRAT gebruikt waarde-intervallen voor uren van een etmaal, dagen van de week, en een willekeurige derde variabele, terwijl de WBD in het algemeen uitgaat van uren/dagen van de week, temperatuur en relatieve vochtigheid [8]. Beide tools gaan uit van een beginsituatie, die in termen van waarde-intervallen wordt gedefinieerd om het energiegebruik bij gegeven weersomstandigheden te voorspellen. Eén nadeel van deze methoden is dat veel gegevens vereist zijn voor de definitie van een bruikbare beginsituatie. Een ander nadeel is de onmogelijkheid om energiegebruik te voorspellen dat buiten het bereik van de data van de beginsituatie valt. De ABCAT tool is uniek, omdat het uitgaat van fysische grondbeginselen die in een kalibreerbaar wiskundig model zijn opgenomen, een "white box" methode dus, waarmee het energiegebruik kan worden voorspeld onder gegeven weersomstandigheden [9].

BESCHRIJVING ABCAT TOOL

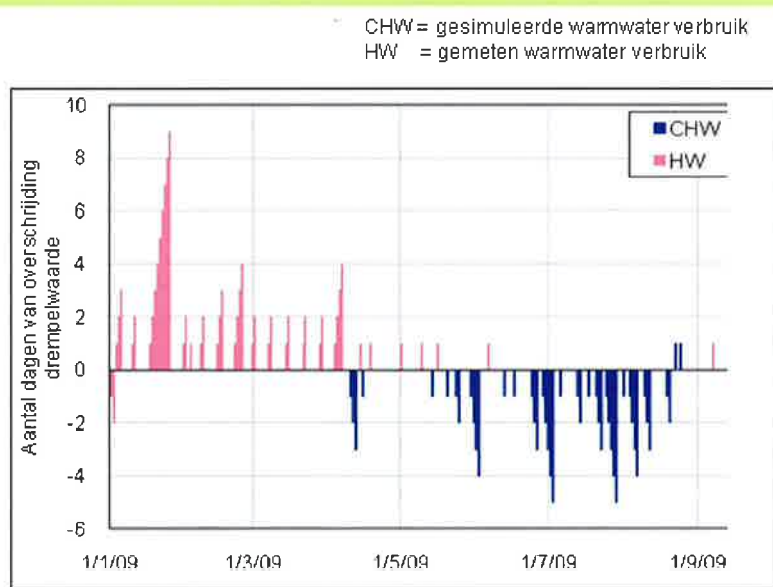
De ABCAT tool voor energieanalyse voor het gehele gebouw vereist slechts het gebruik van drie sensoren (sommige sensoren bestaan in feite uit een combinatie van meerdere sensoren, maar worden ter wille van de duidelijkheid één sensor genoemd). In figuur

1 zijn de energiegebruiksmeters weergegeven. In sommige gebouwen zijn deze meters/sensoren reeds aanwezig, en bovendien zo nodig alsnog goedkoop en eenvoudig zijn die aan te brengen voor de registratie van (i) het totale elektriciteitsverbruik, (ii) het totale warmteverbruik, (iii) het totale koudeverbruik. Door het beperkte aantal verbruiksmeters en sensoren is deze tool kosteneffectiever, eenvoudiger en beter aansluitend op de vraag in de markt dan die hierboven beschreven complexe systemen. Het voorspelde energiegebruik wordt vergeleken met het gemeten energiegebruik, terwijl fouten/storingen/afwijkingen worden gedetecteerd op basis van statistisch significante afwijkingen daartussen [10]. Het belangrijkste doel van de ABCAT tool is de detectie van fouten/afwijkingen en storingen die op de lange duur een significante impact hebben op het energiegebruik. De ABCAT tool brengt vooral cumulatieve effecten aan het licht.

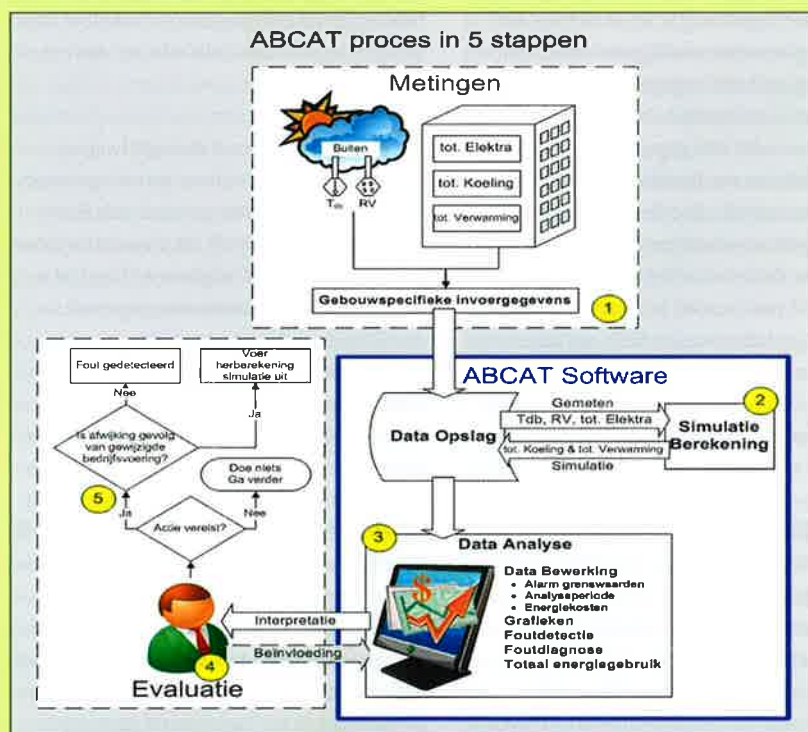
Een gedetecteerde fout/storing/afwijking kan in vele grafische vormen worden getoond als afwijking tussen het gesimuleerde en het gemeten energiegebruik. De presentatie speelt een cruciale rol in de diagnosestelling. Dat is de reden dat het primaire energiegebruik in de ABCAT tool als het cumulatieve energieverval getoond wordt zoals in figuur 2 is weergegeven. In figuur 2 wordt op dagbasis het verschil getoond tussen het gesimuleerde energiegebruik en het gemeten verbruik, plus het gecumuleerde verschil van de voorgaande dagen. Alles wordt uitgedrukt in geldbedragen, door eenvoudig het energieverval te vermenigvuldigen met de kosten per eenheid voor de betreffende installatie. Gebruikers worden immers vermoedelijk in de universele taal van het geld het effectiefst aangespoord tot actie. Omdat visuele storingsdetectie sterk door



-Figuur 2- Voorbeeld van een weergave van een cumulatief energieverschil.



-Figuur 3- Voorbeeld van dagen waarin de drempelwaarden overschreden worden.



-Figuur 4- Het ABCAT proces in vijf stappen.

ervaring wordt bepaald, werd de grafiek "Aantal dagen van drempeloverschrijding" ontwikkeld en toegevoegd aan de ABCAT tool, zodat storingen analytisch kunnen worden gedetecteerd. Figuur 3 is een voorbeeld hiervan. Vergeleken met de grafiek van figuur 2, "Cumulatieve Energie(of kosten)verschil", maakt figuur 3 het relatief eenvoudig het tijdstip te bepalen waarop een storing begint en eindigt, en verschaft meer objectieve meetgegevens daarover. Een standaard voor foutdetectie wordt eenvoudig gedefinieerd als een afwijking tussen gesimuleerde en gemeten verbruik dat groter is dan 1 maal de standaarddeviatie in dezelfde periode in de referentietoestand, en moet ten minste 30 dagen lang aanhouden. Figuur 3, "Voorbeeld van dagen waarin de drempelwaarden worden overschreden" wordt vervaardigd op basis van deze definitie. Elk grafiekpunt representeert het aantal dagen in de daaropvolgende 30 dagen (inbegrepen dag op de x-as waar het punt wordt geplot) waarop het verbruik ten minste deze afwijking vertoonde. Bijvoorbeeld, een punt op hoogte 10 betekent ten minste 10 dagen in de daarop volgende dagen met ten minste deze afwijking. Een storingsperiode verschijnt dus als een punt op een hoogte van ten minste 30 in deze grafiek. Indien van toepassing, wordt de invloed van de storing op de energiekosten getoond in de grafiek voor het cumulatief energieverschil.

In figuur 4 is een flowdiagram weergegeven, dat de vijf stappen van het ABCAT-proces toont. In de eerste stap worden meetgegevens van het weer en van het energiegebruik geïmporteerd. In de tweede stap worden energiegebruiken voor verwarming en koeling gesimuleerd op basis van de weergegevens en het gekalibreerde wiskundige model. In de derde stap worden gemeten- en gesimuleerde verbruiken geanalyseerd. De geleverde energieprestaties en de relevante grafieken worden automatisch getoond. In de vierde stap worden eventuele storingen geconstateerd en wordt tevens aangegeven of daar actie op ondernomen kan en moet worden. In de laatste- de vijfde stap wordt nagegaan of de vereiste verandering in de bediening van de installaties een zodanige verandering van verbruik veroorzaakt, dat een nieuwe calibratie nodig is. Als de verandering in het verbruik niet het gevolg is van een vereiste wijziging, dan moet de gebruiker van de ABCAT-tool dit als een fout/storing/afwijking opvatten en een diagnose stellen, op basis van ervaring en de geleverde diagnostische informatie.

ABCAT Interface

ABCAT is een softwaretool, die is ontwikkeld als een Excel spreadsheet, bestaande

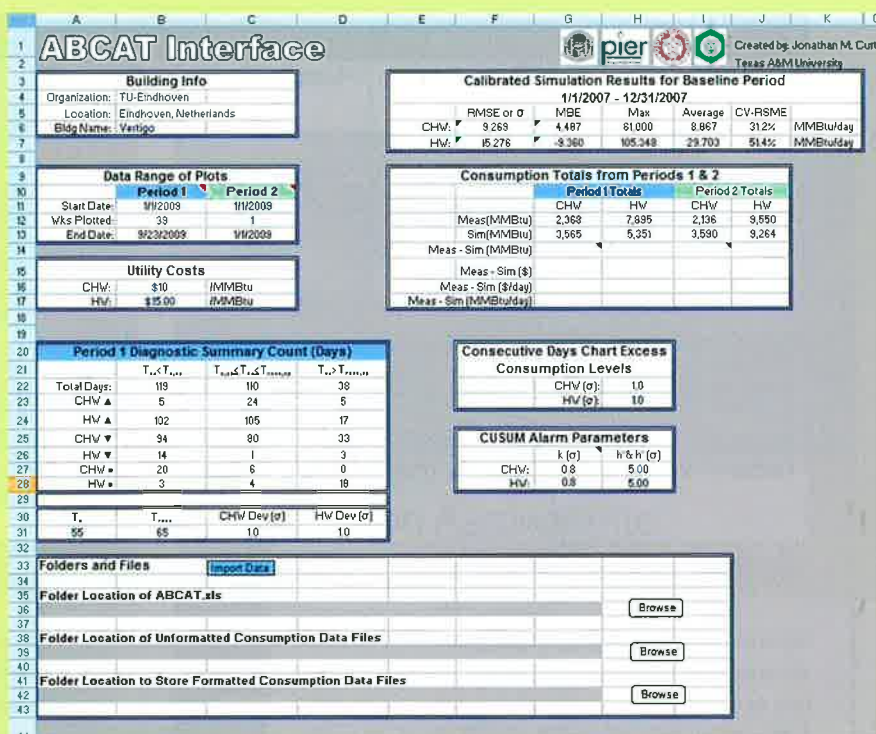
uit verscheidene werkbladen, grafieken en speciaal ontwikkelde macro's. Het werkblad *Interface*, weergegeven in figuur 5, geeft de gebruiker toegang tot alle functionaliteit van de tool. De gebruiker kan (i) de datums van de te analyseren periode invoeren, (ii) de drempelniveaus voor diverse alarmsignalen wijzigen, (iii) energiekosten specificeren, (iv) folders voor gegevensbestanden opgeven voor het automatische importeren en opslaan van bestanden, (v) statistische resultaten bekijken van de simulatie en van de referentietoestand, naast die van een samenvatting van het verbruik in de gesimuleerde periodes. De invoer voor de simulatie geschiedt via een afzonderlijk werkblad, waarop met de macro's de simulatie kan worden uitgevoerd. De uitvoer van de simulatie komt in weer een ander werkblad te staan, samen met de meetwaarden. Die meetwaarden zijn dagtotaal van verbruiken voor verwarming en koeling. Het gemeten elektriciteitsverbruik wordt ingevoerd als een dagtotaal als dit geen directe invoerwaarde is voor de simulatie of als drie gemiddelde waarden per dag voor het elektriciteitsverbruik worden ingevoerd: (i) een onbezette ochtendperiode, (ii) een bezette periode en een (iii) onbezette avondperiode als de meetgegevens directe invoerdata zijn voor de simulatie.

ABCAT: ontwikkeling en test

Teneinde ABCAT te kunnen testen waartoe de tool in staat is en de ontwikkeling ervan te bevorderen, zijn tal van 'retrospectieve' tests uitgevoerd. De eerste groep gebouwen, bestaande uit een vijftal gebouwen op de campus van Texas A&M University, waren al eens gebruikt voor een studie naar het permanente karakter van de resultaten van commissioning (voor de jaren 1996 – 2000). Er waren van deze gebouwen tamelijk volledige verbruiksgegevens, historische documentatie over de geïmplementeerde commissioning-maatregelen, evenals documentatie van enkele veranderingen in de beschouwde periode in de 'setpoints' van regelsystemen. In samenhang met de retrospectieve test, werd ook een groep van vijf 'live' test cases uitgevoerd.

Retrospectieve testen

Er werden 24 fouten/storingen gedetecteerd in 20 "gebouwjaren" van verbruiksgegevens. Op basis van deze historische gegevens werd één fout/storing gedetecteerd in het gekoeld watercircuit en zes in het warmwatercircuit. De overige fouten bleven onbevestigd vanwege de gebrekkige kwaliteit en de onvolledigheid van de gegevens over het onderhoud van de gebouwen. Een samenvatting van deze tests staat in Tabel 1.



-Figuur 5- Het ABCAT User Interface.

Gebouw	Testperiode	Resultaten en bevindingen
17.800 m ² universiteitsgebouw	Jan 1997 – Dec 2000	-Twee storingen over excessief energiegebruik voor verwarming (HW Storing 1 en 2); misschien vanwege schaalproblemen op de warmwater verbruiksmeter. -Geconstateerde afname in de koelenergie (CHW Storing 1); misschien vanwege een toename van de setpoint koudwatertemperatuur.
15.300 m ² universiteitsgebouw	Nov 1996 – Dec 2000	-Significante afname in de gemeten verwarmingsenergie (HW storingen 1 - 4, en 6), vanwege een warmtapwater verbruiksmeterprobleem. -Excessief energiegebruik voor verwarming (HW Storing 5) vanwege problemen in het gebouw sinds april 1999, beschreven in [11]. -Vijf storingen over de koelenergie (CHW Storing 1-5). CHW Storing 1-3 en 5 kunnen niet gediagnosticeerd worden vanwege gebrekkige data. De redenen voor CHW Storing 4 waren dezelfde als voor HW Storing 5.
16.700 m ² universiteitsgebouw	Maart 1997 – Dec 2000	-Significante afname in de gemeten verwarmingsenergie (HW Storing 1); mogelijk vanwege een warmwater verbruiksmeterprobleem. -Excessief verwarmingsenergiegebruik (HW Storing 2); misschien vanwege toename in de minimale luchtstroomverhouding en de toename van de setpoint warmwatertemperatuur. -De maximale afwijking in de afgelopen vier jaar van het koelenergiegebruik is ongeveer 1 % van het cumulatieve verbruik. Dit wijst erop dat de simulatie in staat is voor een vrijwel ongewijzigd gebouw het gebruik nauwkeurig te voorspellen.
10.600 m ² universiteitsgebouw	Jan 1998 – Dec 2000	-Er is geen storing/ afwijking gedetecteerd met ABCAT in het energiegebruik voor verwarming en voor koeling.
12.100 m ² universiteitsgebouw	Aug 1996 – Dec 2000	-Twee excessieve verbruiken van koelenergie werden geconstateerd (CHW Storing 1 en 2), maar konden niet gediagnosticeerd worden vanwege gebrekkige data.

-Tabel 1- Testgebouwen, resultaten en bevindingen uit retrospectieve tests met ABCAT

Gebouw	Locatie	Testperiode	Resultaten en bevindingen
7.600 m ² universiteits-restau- rant	College Station, Texas, USA	Maart 2005 – juli 2007	Excessief koelingenergiegebruik. Deze storing houdt verband met excessieve latente koeling door een zeer lage uitstroom luchttemperatuur door twee van de drie uitwendige luchtkasten – Zomer 2006.
44.700 m ² huisvesting automati- seringsdiensten	Austin, Texas, USA	Mei 2005 – juli 2007	Storing 1: significante afname van het gemeten koelingenergiegebruik vanwege meter kalibratie – okt 2005. Storing 2: significante toename van het gemeten koelingenergiegebruik in Nov. 2006. Ook een succesvolle korte termijn aanpassing van de simulatie aan meerde aanpassingen van de referentiesituatie.
16.700 m ² kantoorgebouwen	Albany, New York, USA	Jan 2007 – juli 2007	Succesvol monitoring van verwarmingsenergiebesparingen na implementatie van energiebesparende maatregelen. Training en ondersteuning van twee ABCAT-testers.
17.600 m ² kantooortoren	Omaha, Nebraska, USA	Feb. 2007 – juli 2007	Bevestiging van optimale verwarmings- en koelenergie door voortdurende bewaking van meetbare parameters. Identificatie van een defecte warmwatermeter verbruiksmeter.

-Tabel 2- Testgebouwen, resultaten en bevindingen van een 'live' ABCAT implementatie.

De retrospectieve tests voor vijf gebouwen van uiteenlopende typen gaven de mogelijkheid de bruikbaarheid van ABCAT-simulaties te testen op hun bruikbaarheid. De resultaten laten zien dat het mogelijk is fouten/storingen te detecteren en te diagnosticeren voor post-commissioning gebruik in gebouwen.

Live Test

Een live test met ABCAT werd uitgevoerd in vier gebouwen, met behulp van data die een periode van meer dan vijf jaar bestrijken. Die data zijn in uiteenlopende mate geautomatiseerd, afgestemd op de beschikbaarheid, specifieke aard en formaat van die data. Deze live test maakte het mogelijk een leercurve te doorlopen waarmee toekomstige ontwikkelingen in die gebouwen kunnen worden beïnvloed. Een samenvatting van deze testgebouwen staat in Tabel 2.

Het testen van de ABCAT in deze vier gebouwen en de identificatie van vijf potentiële storingen in vijf "gebouwjaar" en de daaropvolgende diagnostische redeneringen, hielpen vorm te geven aan enkele van de specifieke ideeën voor de verdere ontwikkelingen van de ABCAT. Een essentieel punt dat uit de live test naar voren komt is dat de waarde van de ABCAT niet ligt in het interpreteren van korte termijnobservaties, maar eerder in die van een termijn van weken of maanden.

CONCLUSIES

Verdere ontwikkeling en testen van de ABCAT-tool is aan de gang. Diverse tools en procedures voor detectie en diagnose worden geanalyseerd met het oog op implementatie daarvan in de ABCAT. Tegelijkertijd wordt de ABCAT getest op vele verschillende gebouwtypen teneinde de robuustheid en de algemene toepasbaarheid te kunnen vergroten. Naast de oorspronkelijke doelstellingen van prestatiebewaking en -optimalisering na de commissioning van gebouwen zijn er nog

andere voordelen en alternatieve functionele benaderingen op te merken, waaronder: het gebruik van de ABCAT als controle of de verwachte energiebesparingen na commissioning inderdaad gerealiseerd blijken te zijn, een eenvoudige energie-analysetool voor hele gebouwen (zelfs zonder het gesimuleerde verbruik), alsmede voor verificatie van metergegevens en aanvulling van ontbrekende meetgegevens voor facturering van de energiekosten. Dit is allemaal van belang voor klanten van openbare nutsbedrijven en voor die bedrijven zelf.

SYMBOLLEN

- dT : temperatuurverschil
- RV : Relatieve Vochtigheid
- T_{db} : droge bol temperatuur
- kWh : elektriciteitsverbruik hele gebouw
- kWh_n : energiegebruik voor verwarming hele gebouw
- kWh_k : energiegebruik voor koeling hele gebouw

REFERENTIES

1. Mills, E. 2009. Building Commissioning: A Golden Opportunity for Reducing Energy Costs and Greenhouse-gas Emissions.
2. Turner, W. D., D. E. Claridge, S. Deng, S. Cho, M. Liu, T. Hagge, C. J. Darnell and H. J. Bruner. 2001. Persistence of Savings Obtained from Continuous Commissioning. Proceedings of the 9th National Conference on Building Commissioning, Cherry Hill, NJ.
3. Isermann, R. 1984. Process Storing Detection Based on Modelling and Estimation Methods – A Survey. Automatica: 20(4), pp387-404. Great Britain.
4. Hyvarinen, J. and S. Karki, Eds. 1996. Building Optimization and Storing Diagnosis Source Book. Technical Research Center (VTT), Espoo, Finland.
5. Vaezi-Nejad, H., Jandon, M., and Visier, J.C. 2001. Automatic Tools for Storing
- Detection and Diagnostic of HVAC Systems for Hotel and Office Building. Presented at the The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) National Conference, London, UK. October 18.
6. Knebel, David, E. 1983. Simplified Energy Analysis Using the Modified Bin Method – Prepared for the American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE: Atlanta, GA.
7. Song, L., Liu, M., Claridge, D.E., and Haves, P. 2003. Study of On-line Simulation for Whole Building Level Energiegebruik Storing Detection and Optimization.
8. Friedman, H. and Piette, M.A. 2001. Comparison of Emerging Diagnostic Tools for Large Commercial HVAC Systems. California Energy Commission Public Interest Energy Research Program – High Performance Commercial Building Systems, HPCBS # E5P2.2T1a2.
9. Curtin, Jon. 2007. Development and Testing of an Automated Building Commissioning Analysis Tool (ABCAT). Thesis. Texas A&M University, August.
10. Lee, S.U., F. Painter and D. Claridge. 2007. Whole Building Commercial HVAC Systems Simulation for Use in Energiegebruik Storing Detection. ASHRAE Transactions: 113(1), pp52-61.
11. Chen, H.; Deng, S.; Bruner, H. L.; Claridge, D. E.; Turner, W. D. 2002. Continuous Commissioning Results, Verification, and Follow-up for an Institutional Building: A Case Study. Proceedings of the Thirteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Houston, TX, USA, May 20-22.