

Slimme regeling van gebouwen

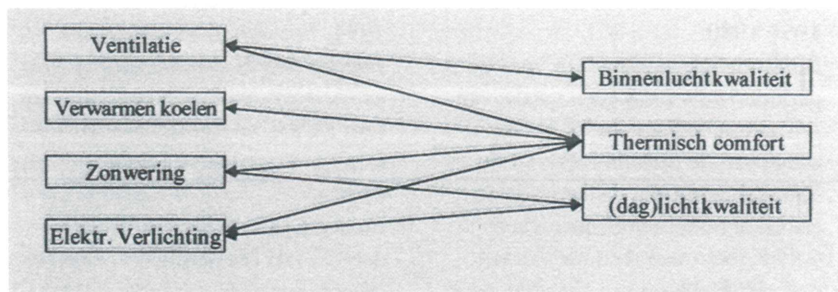
In de afgelopen jaren heeft er een revolutionaire ontwikkeling plaatsgevonden op het gebied van micro-elektronica, netwerken en sensoren en ook op het gebied van de regeltechniek. Het is de verwachting van de auteurs dat de combinatie van deze ontwikkelingen in de nabije toekomst een groot effect zal hebben binnen de gebouwde omgeving zoals in de installatiewereld. Steeds meer toegepaste regelsystemen zijn geënt op technieken die zijn ontwikkeld in het kader van Kunstmatige Intelligentie zoals Fuzzy Logic, Genetische Algoritme en Neurale Netwerken. Technieken waarmee relatief complexe en flexibele multivariabele regelingen mogelijk worden die ook zogenaamde zelflerende eigenschappen kunnen hebben waardoor niet alleen instelpunten maar ook de regeling 'zichzelf' kan aanpassen aan de gegeven omstandigheden.

-door L.G. Bakker en ir. W. Plokker*

De energievraag in gebouwen is groter dan strikt nodig is gezien de huidige ontwikkelingen in de regeltechniek en de micro-elektronica. Integratie van slimme regelingen in gebouwssystemen kunnen substantiële energiebesparingen opleveren bij een verbeterd comfort. TNO heeft de ambitie een rol te gaan spelen in dit potentieel waaraan wordt gewerkt binnen verschillende nationale en internationale projecten. Verder wil TNO Bouw een discussiegroep in het leven roepen ('Smart

Building Society') die zal bestaan uit partijen uit verschillende relevante disciplines, van Universiteit via bedrijven die systemen, sensoren etc. produceren, tot bedrijven die zich bezighouden met implementatie van installaties. Het doel zal zijn kennisuitwisseling, het vormen van een Nederlandse visie, en gezamenlijke nationale en internationale projecten initiëren.

Dit artikel geeft een overzicht van relevante aspecten die een rol spelen bij de ontwikkeling van slimme regelingen.



De relaties tussen de verschillende systemen en binnenklimaataspecten

-FIGUUR 1-

Verder worden aan de hand van een voorbeeld, de aspecten van een slimme regeling geïllustreerd.

WAT IS SLIMME REGELING?

Een slimme regeling is in principe gebaseerd op drie pijlers:

- integratie;
- voorspelling;
- adaptie (zelf lerend).

Integratie

Relevante binnenklimaatparameters moeten geïntegreerd worden geregeld om relevante relaties tussen de verschillende systemen en binnenklimaatparameters adequaat op elkaar af te kunnen stemmen (zie figuur 1).

Een voorbeeld van deze geïntegreerde aanpak is het gebruik van additionele nachtelijke ventilatie om in warmere perioden de gebouwconstructie af te koelen om de koelenergie te verminderen en het beperken van te hoge dagtemperaturen. Een ander voorbeeld is het minimaliseren van de zontoetreding in warme perioden en het maximaliseren van de zontoetreding in koude perioden door een geregelde zonwering. Of in meer algemene zin: bij afwezigheid de zontoetreding optimaliseren naar minimaal energiegebruik en maximaal (toekomstig) binnencomfort. Bij aanwezigheid van personen moet voor de regeling een optimale daglichtsituatie prevaleren zoals in zekere zin het comfort moet prevaleren boven de energievraag. Een minimaal comfortniveau moet worden gehandhaafd. De vraag moet zijn: "Hoe kan ik een goed comfort realiseren bij

* TNO Bouw, Delft

Artikel naar aanleiding van de TVVL/TNO-dag op 28 september 1998 in Gelredome, Arnhem

een minimale energievraag en zo laag mogelijke installatie gerelateerde kosten?" En vragen als: "Kan ik door een goed geregelde zonwering een koelinstallatie uitsparen?" Met het oog op nachtstroom, piekvraagreductie en in bredere zin de vrije energiemarkt, kan integratie van wisselende energieprijzen in de regeling voordelen opleveren.

Voorspelling

Voor een optimaal gebruik van de dynamische eigenschappen van gebouw en installatie moeten slimme regelingen voorspellend regelen, dat is relevant voor de binnenluchtkwaliteit maar vooral voor de interne temperaturen.

Voorspelling van het buitenklimaat, voorspelling van de respons van de combinatie gebouw - installatie op regelacties en de voorspelling van kantoorgebruik (aanwezigheid) vormen hiervoor de basis.

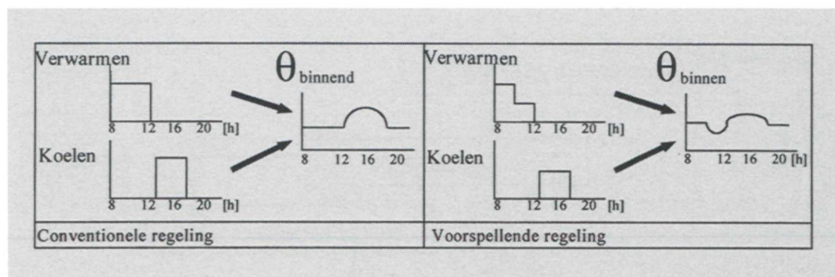
Voor het voorspellen van het buitenklimaat blijken relatief eenvoudige technieken al behoorlijk effectief. Voor de voorspelling van de response van het gebouw op een regelactie kan een fysisch of black-boxmodel worden gebruikt. (Men spreekt dan over een 'model-gebaseerd regelsysteem'). Ook kan de voorspelling direct zijn 'ingebakken' in b.v. een FUZZY-regeling waarbij de toestanden in het verleden worden meegenomen in de regeling.

In het kader van de voorspelling van personen aanwezigheid, of beter: de kans op aankomst, is TNO bezig met de ontwikkeling van een module die aanwezigheid voorspelt op basis van de gemeten / vastgestelde aanwezigheid in het verleden. Eventuele weekpatronen en tweewekelijkse patronen worden hierbij herkend en meegenomen in de voorspelling (b.v. om de 14 dagen vrijdagmiddag vrij). Afhankelijk van de kans op aankomst kan dan het klimaat worden geregeld.

Bij toenemende kans op aankomst moet door aanpassing van het binnenklimaat de tijd die nodig is om tot een comfortniveau te komen afnemen.

Adaptie

Een slimme regelaar moet adaptief of zelflerend zijn. De regelaar moet zichzelf aanpassen aan de specifieke gebouw en vertrekkeigenschappen, zoals thermische massa, raamgrootte en gebouwinstallatie.



Voorspellend regelen waardoor tijdelijke verlaging van het setpoint voor verwarming de zontoetreding voor een deel wordt benut en energie wordt gespaard.

-FIGUUR 2-

Om dit te realiseren kan een model worden gebruikt om de respons van de combinatie gebouw en installatie te voorspellen. Dit model kan worden getraind op basis van de gemeten gebouwrespons op regelacties en buitenklimaat.

Verder is het wenselijk, zeker als er sprake is van individueel geregelde vertrekken, dat de regelaar zich 'zelf' kan aanpassen aan de gebruiker(s) zowel in de zin van directe aanpassing van instelpunten als in de zin van aanpassing van basisinstellingen (instelpunten voor de volgende morgen etc.).

De aanpassing van basisinstellingen moet vooral gebeuren op basis van het gebruikersgedrag. Voor de binnentemperatuur is dat goed te realiseren omdat gebruikers deze goed in kunnen stellen. Voor daglicht en ventilatie is aanpassing van basisinstellingen lastiger omdat deze instellingen minder eenduidig zijn en minder consistent. Zeker bij adaptieve (zelflerende) systemen, ligt het gevaar van instabiliteit, ongewenste regelacties op de loer. Het is duidelijk dat een goed ontwerp en een goede werking van de regelaar en van de gebruikers-interface van zeer groot belang zijn en dat de regeling te allen tijde met de hand moet kunnen worden bijgesteld of zelfs overbrugd.

WAT IS VAGE LOGICA EN WAT ZIJN NEURALE NETWERKEN EN GENETISCHE ALGORITMEN?

Voor de realisatie van een slimme regeling is de conventionele regeltechniek praktisch onbruikbaar afgezien van de regeling van de verschillende instelpunten die worden 'opgegeven' door de slimme regelaars. Voor de bepaling van de instelpunten en de adaptie zijn zogenaamde 'soft computing technieken' onontbeerlijk zoals vage logica, neurale netwerken en genetische algoritmen.

Dit zijn technieken afkomstig uit het gebied van de kunstmatige intelligentie slechts gebruikt door een handjevol academici. Inmiddels zijn er verschillende ontwikkelingen die deze technieken ook bruikbaar maken voor de praktijk.

Fuzzy logic

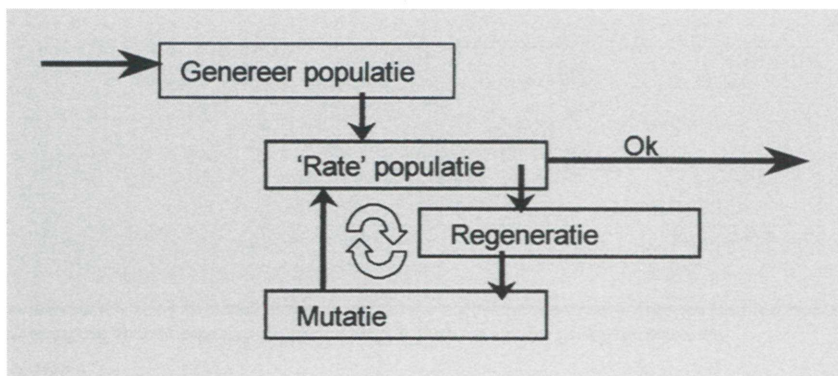
Vage logica (Fuzzy Logic) en neurale netwerken zijn behandeld in het artikel 'Geavanceerde regeltechniek' in het TVVL-Magazine van juli/augustus 1999 nr.7/8. Voor fuzzy logic wordt hier naar verwezen.

Neurale netwerken

Een neuraal netwerk is, een netwerk met knooppunt, analoog aan het neurale netwerk 'de hersenen'. Deze knooppunten voeren eenvoudige bewerkingen uit op de ingangen van deze knooppunten bijvoorbeeld: uitgang = ingang a x 3 + ingang b / 2 + 5 etc. Er kunnen meerdere lagen worden toegepast tussen de ingangen en uitgangen van het totale netwerk en het is mogelijk dynamische effecten te integreren. Voor gebruik moet een netwerk worden 'getraind' om de juiste bewerkingen in de knooppunten te bepalen en te optimaliseren. Dit moet gedaan worden aan de hand van gegevens van het systeem (in- en uitvoer). Dit zogenaamde 'blackboxmodel' wordt o.a. met succes toegepast bij beeld en spraakherkenning.

Genetische algoritmen

Genetische algoritmen hebben een analogie met de evolutietheorie. Er wordt gewerkt met een populatie van individuen die worden gerangschikt naar prestatie. De 'genetische' informatie van de individuen met de beste prestatie krijgen voorrang bij de regeneratie van een nieuwe populatie. Individen van een nieuwe generatie zijn combinaties van individuen van een oudere generatie. Een populatie indi-



Schematische voorstelling van genetische algoritmen

-FIGUUR 3-

viduen kan b.v. een verzameling regelacties zijn voor de komende zes uur. Als op basis van modellen de prestatie van de verschillende individuele regelacties gerangschikt worden op comfort en energiegebruik, kunnen combinaties gemaakt worden uit de beste oplossingen en zo de regelactie worden geoptimaliseerd.

Om ook oplossingen te kunnen vinden buiten het 'oplossingsveld' aangegeven door de eerste populatie worden er per populatie enkele individuen willekeurig veranderd (mutatie in de evolutie). Deze techniek is zeer geschikt voor discrete systemen en kan daarmee ook voor ontwerptoptimalisatie dienen. De kans op een lokaal minimum of maximum is minder groot ten opzichte van veel andere technieken. Het aantal mogelijke combinaties, en daarmee de rekentijden, kunnen bij complexe systemen wel snel toenemen.

EEN SLIMME REGELING

Binnen een aantal nationale en internationale projecten wordt gewerkt aan verschillende regelingen waarvan er al enkele in de praktijk worden toegepast. Om inzicht te verschaffen in de mogelijkheden wordt hier een beschrijving gegeven van één van de compleetste regelingen die bij TNO in ontwikkeling is. Het gaat om een integrerende, voorspellende adaptieve regeling. De regelaar regelt verwarming, koeling, elektrische verlichting, ventilatie en zonwering op basis van fuzzy logic, neurale netwerken en genetische algoritmen. Omdat de regelaar zelflerend (adaptief) is en zich dus automatisch aanpast aan de specifieke situatie van het gebouw, installatie en het klimaat, is gedetailleerde modellering van minder belang.

Binnenluchtkwaliteit, achtergrond

Drie verschillend vervuiliingsbronnen zijn hier aan te wijzen: mensen, interieur en bepaalde activiteiten als roken. Mens gerelateerde vervuiling bestaat uit CO_2 en uit, in de praktijk moeilijk meetbare, biologische vervuilingen en vervuilingen afkomstig uit kleding. CO_2 kan als indicator worden gebruikt. De productie van CO_2 hangt af van het activiteitsniveau [1]. Het interieur (meubels, vloerbedekking etc.) produceert vooral VOC's (volatile organic compounds). Een temperatuursafhankelijke VOC-productie hangt in sterke mate af van de specifieke meubels etc.

VOC's kunnen worden gemeten [1] maar sensoren zijn te duur voor toepassingen per vertrek; ze worden echter wel toegepast in de centrale ventilatie-afvoer ter bepaling van gemiddelde waarden. Het aantal mogelijke substanties van de verontreiniging compliceert de beoordeling. Activiteiten zoals roken, veroorzaken moeilijk te meten en te voorspellen vervuilingen. Een praktische oplossing is individueel ventileren op basis van CO_2 -concentraties. De buitenlucht CO_2 -concentratie en de CO_2 -productie per persoon in kantoorgebouwen kunnen constant worden aangenomen [1].

Als wordt verondersteld dat de binnenkomende lucht goed is te mengen met de binnenlucht geldt:

$$\text{CO}_2(t) = \frac{1}{V_{\text{eff}}} \int (\text{bezetting}(t) - \text{CO}_{2\text{-productie}} + \text{ventilatie}(t) \cdot (\text{CO}_{2\text{buiten}} - \text{CO}_2(t))) dt$$

Waarbij:

$\text{CO}_2(t)$ = de CO_2 -concentratie;

V_{eff} = effectieve volume kamer;

$\text{bezetting}(t)$ is het aantal aanwezigen;

$\text{CO}_{2\text{-productie}}$ = de CO_2 -productie door

personen, $\text{ventilatie}(t)$ = het ventilatie-debiet en $\text{CO}_{2\text{buiten}}$ = de CO_2 buitenconcentratie.

Een vergelijkbare formule kan worden opgesteld voor de VOC's.

Bij TNO wordt binnen het kader van een Europees project onderzocht of een regelaar op basis van een CO_2 -sensor, een aanwezigheidsensor, informatie over de ventilatie en een gebruikersinterface kan worden gerealiseerd, waarbij de CO_2 als indicator voor mensgerelateerde vervuiling dient en de interactie van de gebruiker's morgens voor de niet-mens gerelateerde vervuiling dient. Voorgaande formule wordt gebruikt bij het 'samenvoegen' van beide 'bronnen' die vervolgens worden gebruikt voor de regeling van de ventilatie.

Binnenluchtkwaliteit in de praktijk

In de praktijk blijken kosten voor sensoren en installatie belangrijke factoren. De kosten van CO_2 -sensoren zijn nog aanzienlijk met f1000.- tot f3000.- maar actuele ontwikkelingen maken een veel lagere kostprijs mogelijk, waardoor de prijzen na verloop van tijd substantieel kunnen dalen en het gebruik van een CO_2 -sensor per vertrek realiseerbaar wordt.

VOC's en andere gebouw gerelateerde vervuilingen zijn vooral een probleem als het gebouw voor langere tijd niet of weinig is geventileerd b.v. 's nachts. Problemen kunnen worden voorkomen door te ventileren voordat de ruimte in gebruik wordt genomen. Het is gewenst dat de gebruiker altijd de ventilatie moet kunnen aanpassen i.v.m. onvoorspelbare en ongemeten vervuilingen. Ter voorkoming van Sick Building-effecten en temperatuurschommelingen, moet de gebruiker de reactie van het systeem direct kunnen waarnemen desnoods via de gebruikersinterface. Het ontwerp en de werking van de gebruikersinterface is van groot belang voor het goed werken van het systeem. Het moet simpel en gebruikersvriendelijk zijn zodat geen handleiding nodig is voor gebruik.

De binnentemperaturen

Het gebruikte thermische gebouwmodel bestaat uit een eenvoudig tweede orde dynamisch model (figuur 4). De totale warmte Q kan worden toegevoegd met alleen direct effect op de lucht en het binnengedeelte van de wanden [2].

Het model heeft twee tijdconstanten nodig voor relatief snelle veranderingen bij b.v. luchtverwarming (b.v.: $\tau_1 = 26$ min and $\tau_2 = 154$ h).

De totale zontransmissie wordt bepaald op basis van (uurlijkse) klimaat gegevens en hoekafhankelijke zontransmissie, berekend met het door TNO ontwikkelde programma Advanced Windows Information System WIS [3]. Om thermisch discomfort te kwantificeren worden vaak complexe systemen gebruikt zoals van de Predicted Mean Vote van Fanger [4]. Uit de praktijk blijkt dat als gebruikers in verschillende ruimten individueel de temperatuur kunnen instellen een kwadratische kostfunctie rond deze temperatuur als een goed alternatief voldoet. Het daglicht wordt gemodelleerd op basis van de daglichtsimulaties met het Amerikaanse simulatieprogramma voor dag en kunstlicht 'Radiance'.

INTEGRALE PRESTATIE INDICATIE

Om optimalisatie van de regeling te kunnen realiseren wordt de prestatie van de regelaar gekwantificeerd in een zogenaamde 'kostfunctie'. De kostfunctie is een indicatie van de kwaliteit van de regeling of regelactie in termen van 'kosten' voor zowel energiegebruik als discomfort (t.a.v. het thermisch comfort, de binnenlucht kwaliteit en de daglichtkwaliteit). De weegfactoren voor de verschillende aspecten bepalen de mate waarin deze aspecten meewegen in de beoordeling en voorrang krijgen bij optimalisatie. Het is zaak het comfort voldoende gewicht te geven ten opzichte van het energiegebruik. Als aan de minimale comforteisen wordt voldaan is er geen sprake van discomfort en zal de regelaar in praktijk comfort regelen tegen de laagste energiekosten. De kostfunctie kan als volgt worden geformuleerd:

$$J = \int (W_1 \cdot U + W_2 \cdot f_1(T) + W_3 \cdot f_2(\text{IAQ}) + W_4 \cdot f_3(\text{licht})) \cdot dt$$

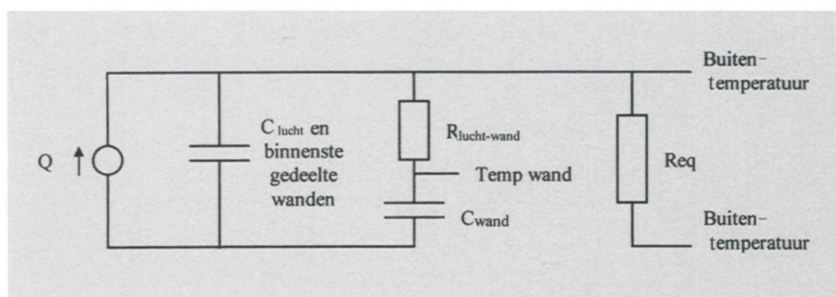
Waarbij:

J = de kostfunctie;

W_1 = de gewichten voor de verschillende aspecten

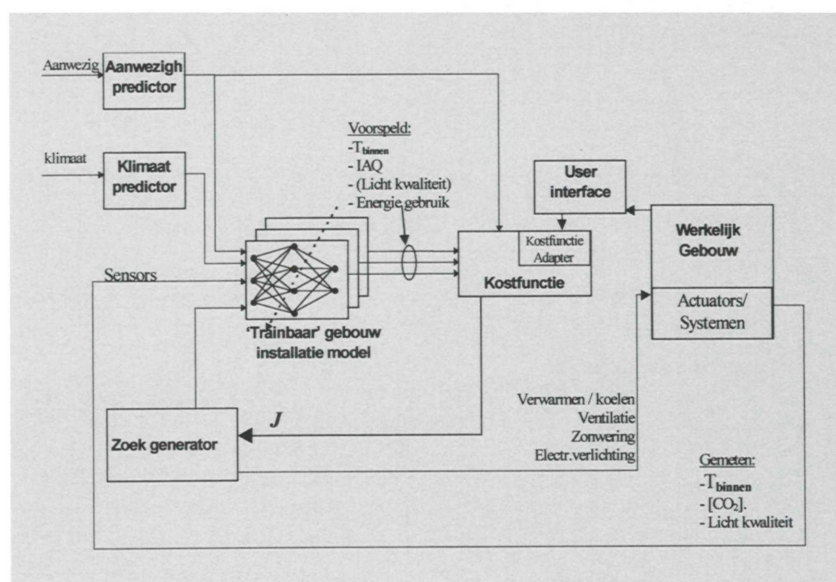
U = de totale primaire energie

$f_1(T)$ = de kostfunctie voor thermisch comfort;



Thermisch tweede orde gebouw model

-FIGUUR 4-



Schema van de model gebaseerde voorspellende regelaar.

-FIGUUR 5-

$f_2(\text{IAQ})$ = de kostfunctie voor binnenlucht kwaliteit en

$f_3(\text{licht})$ = de kostfunctie voor (dag)licht kwaliteit. De kostfunctie wordt geïntegreerd over de tijd. De gewichten voor comfort worden bij afwezigheid van gebruikers op 0 gesteld. Een minimale temperatuur kan worden ingegeven om een bepaalde minimale (nacht)temperatuur te realiseren.

Dit concept van een gecombineerde kostfunctie is nieuw. Bruikbare literatuur hierover is praktisch niet voorhanden. Om niet te hoeven wachten op de niet eenvoudige onderzoekstaak nodig om de weegfactoren goed te kunnen vaststellen, zijn de weegfactoren voorlopig bepaald op basis van ervaring. Het blijkt hierbij van belang comfortaspecten voldoende te wegen ten opzichte van de energiekosten.

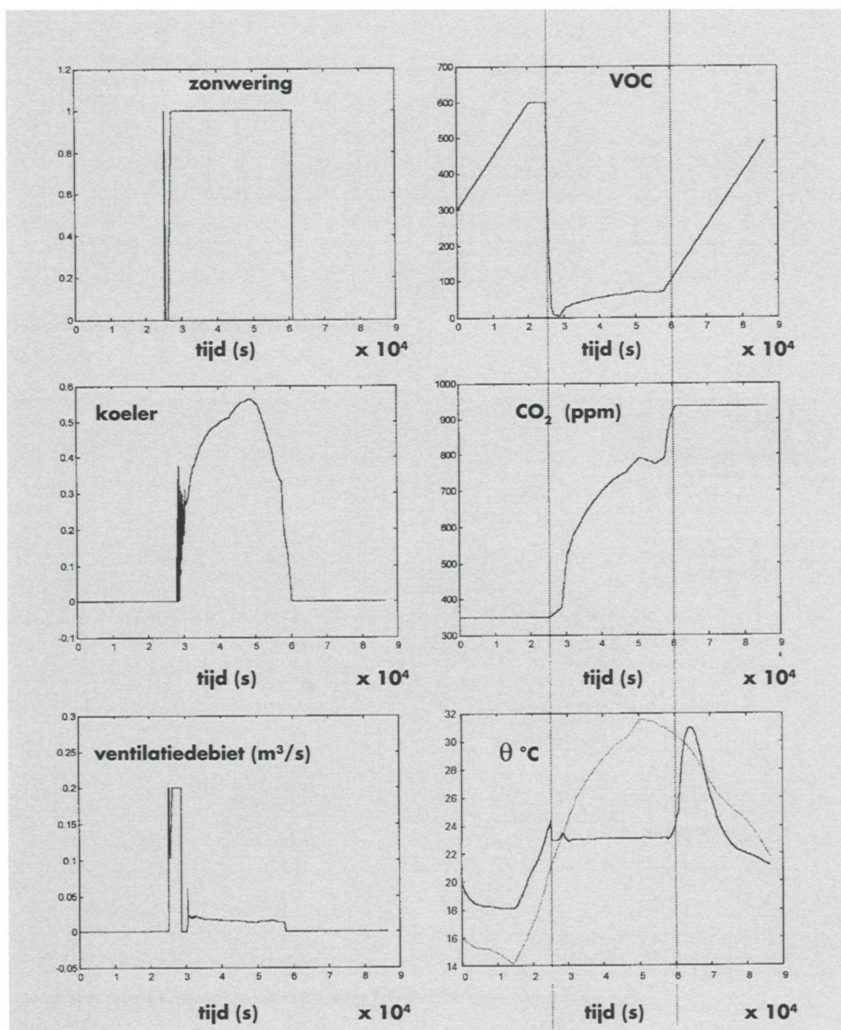
De voorspellende regelaar

De regeling moet zo worden ontworpen dat de kostfunctie kan worden geminimaliseerd. Om dit te bereiken is een integrerende, voorspellende adaptieve regeling ontworpen.

Model-based predictive control (MBPC) blijkt in principe een goede techniek, waarmee een zeer volledige en flexibel, niet lineaire, niet continue multi-input multi-output (MIMO) regelaar met input / output constraints kan worden gerealiseerd. De regelaar is inherent voorspellend als dynamische gebouwmodel(en) worden gebruikt (figuur 5). Een adaptief gebouw-installatie model kan worden gerealiseerd op basis van een fysisch model of een blackboxmodel getraind op basis van de gegevens van een werkelijke gebouw (gemeten) of afkomstig van een gedetailleerd gebouwmodel. De kostfunctie kan door de gebruiker worden aangepast.

Het hart van de regelaar bestaat uit drie blokken

- een 'zoekgenerator' die regelacties voor de komende uren genereert;
- het gebouwmodel dat de binnen temperatuur en de binnenlucht kwaliteit en de daglichtsituatie voorspelt in de komende uren voor de regelactie en voorspeld buitenklimaat;
- het kostfunctieblok waarin de regel-



Resultaten van simulaties (voor 5 juni; onderbroken lijn voor buitentemperatuur; tussen de onderbroken verticale lijnen is de ruimte in gebruik).

-FIGUUR 6-

acties worden geoordeeld (zie boven). Binnen deze kringloop wordt voortdurend gezocht naar de beste regeling voor de komende uren en wordt met een bepaalde tijdstap actueel gemaakt. Daarnaast worden er 'off line' een aantal blokken geoptimaliseerd zoals het gebouwmodel, de klimaatvoorspeller en het blok dat aanwezigheid van personen voorspelt. De resultaten van simulaties met de verschillende (regel)-elementen zijn in figuur 6 aangegeven. De onderbroken lijn is voor de buitentemperatuur, tussen de onderbroken lijnen is de ruimte in gebruik.

CONCLUSIE

Binnen TNO Bouw wordt gewerkt aan regelaars op basis van verschillende technieken, zoals Genetisch geoptimaliseerd Fuzzy control waarvan verschillende regelaars worden getest in testcellen en kantoorvertrekken die in gebruik zijn. Voor verschillende onder-

delen waaronder regeling van zonwering en verlichting, of de regeling van ventilatie in gebouwen, zijn er binnen verschillende projecten regelaars ontwikkeld die reeds toepasbaar zijn en voor een deel reeds worden toegepast.

Om een goed binnenklimaat bij een minimale energievraag te kunnen realiseren zijn voor de regelaar de volgende eigenschappen noodzakelijk:

- de regelaar moet snel en adequaat reageren op de interactie van de gebruiker, de gebruiker moet direct kunnen zien hoe het systeem reageert. Afgezien van een beperkte periode na aankomst zijn concessies over het comfort ten behoeve van energievraagreductie doorgaans onacceptabel;
- de regelaar moet de verschillende aspecten geïntegreerd regelen om de verschillende relaties tussen de verschillende systemen, en binnenklimaatparameters recht te kunnen

doen;

- de regelaar moet rekening kunnen houden met de verschillende dynamische aspecten en moet kunnen anticiperen op voorspelde randvoorwaarden zoals buitenklimaat, moment van aankomst van de gebruiker en de reactie van het gebouw op een regelactie. Hiervoor is voorspellend regelen noodzakelijk;
- omdat een regelsysteem dat geïntegreerd en voorspellend regelt op voorhand moeilijk is in te stellen en om een systeem te hebben dat zich aanpast aan de gebruiker, is een adaptieve (zelflerende) regelaar nodig.

LITERATUUR

1. Bearg, D.W. (1993). *Indoor Air Quality and HVAC Systems*, Lewis Publishers.
2. Madsen, H. and J. Holst (1995). *Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building*. Energy and Buildings 22, pp. 67-79.
3. Bakker, L.G., W. Plokker and D. van Dijk (1996). *WIS Users Guide, incl. Tutorial*, TNO Bouw, Delft
4. NEN-ISO 7730 (1989). *Gematigde thermische binnencondities. Bepaling van de PMV- en PPD-waarde en specificatie van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid*. NNI, Delft.
5. Babuška, R. (1996). *Fuzzy modeling and identification*. Ph.D. -thesis, Control Laboratory, Department of Electrical Engineering, TU Delft.
6. Babuška, R., H. Roubos, S. Molloy, A. Gegov (1998). *Fuzzy modeling and Fuzzy Model-Based Predictive Control*. Control Laboratory, Department of Electrical Engineering, TU Delft.
7. Ferguson, A.M.N. (1990). *Predictive thermal control of building systems*, Ph.D. thesis, Departement de physique, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
8. Lute, P.J. and D.H.C. van Paassen (1990). *Integrated control system for low-energy buildings*. Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, Division Process and Energy, TU Delft.