

UDC 628.852 : 551.5 : 697.1.001.2

EEN PRAKTISCHE METHODE
OM HET TEMPERATUURGEDRAG IN GEBOUWEN
TE VOORSPELLEN

R. S. Soeleman

INHOUD

1. Inleiding
 2. Argumenten voor vereenvoudiging
 3. Berekeningsgrondslag
 4. Meteorologische data
 5. Eenheidspuls-responsiefunctie
 6. Principe van de rekenbewerkingen
 7. Bespreking van enige studieobjecten
 8. Nabeschouwing
-

1. INLEIDING

Er zijn genoeg gevallen bekend waarbij de noodzaak van kunstmatige klimaatbeheersing ten onrechte werd betwijfeld. In zulke gevallen had het resultaat van een juiste voorspelling van de dagelijkse gang van de temperatuur in de betreffende gebouwruimten een belangrijke bijdrage kunnen leveren tot een verstandige uitspraak. Het is daarbij niet voldoende om de binnentemperatuur slechts voor een korte periode met kritieke weersomstandigheden te voorspellen; door een bepaalde berekeningsmethode te volgen is het mogelijk om de voorspellingsperiode uit te breiden tot bijvoorbeeld een tiental jaren. Men kan dan aangeven hoe vaak bepaalde binnentemperaturen zullen worden bereikt of overschreden. De waarde die men aan zo'n voorspelling mag toekennen wordt grotendeels bepaald door de gevolgde berekeningsmethode, de nauwkeurigheid waarmee terzake dienende (bouw)fysische parameterwaarden bekend zijn, en de directe bruikbaarheid van meteorologische data in de vorm waarin ze normaliter door meteorologische stations worden verspreid. Bovendien zal de uitwerking over een zo lange periode alleen zinvol zijn als de berekeningsmethode zonder aan nauwkeurigheid in te boeten sterk vereenvoudigd kan worden. D.w.z. er dient een wezenlijk onderscheid te worden gemaakt tussen de wetenschappelijke exactheid enerzijds en de realiseerbaarheid van de rekenkundige bewerking anderzijds.

Een bepaalde rekentechniek die in de procesanalyse reeds lang gemeengoed is geworden, bezit de eigenschappen die voldoen aan de eisen voor eenvoud en uitvoerbaarheid. Voorts heeft deze rekentechniek nog het voordeel, dat het benodigde rekenmateriaal gescheiden kan worden gehouden in twee geheel van elkaar onafhankelijke categorieën. Namelijk het meteorologische datapakket en een datapakket met de zakelijke informatie van het onderzochte gebouwdeel.

2. ARGUMENTEN VOOR VEREENVOUDIGING

Wenst men de voorspelling voldoende betrouwbaarheid mee te geven dan zal er een ontzaglijk grote hoeveelheid meteorologische data moeten worden verwerkt. Het manipuleren met deze getallen zal reeds een grote hoeveelheid rekentijd in beslag nemen; elke beperking van rekenbewerkingen in de procedure voor de berekening van het thermische proces dat het onderzochte object ondergaat zal de uitvoerbaarheid van het programma vergroten. Dit is zelfs van essentieel belang indien men slechts de beschikking heeft over een digitale computer met beperkte mogelijkheden. In principe zijn er verschillende manieren om het hier beschouwde thermische probleem te programmeren. Wij noemen hiervan de twee volgende:

- door middel van zogenaamde 'finite difference' benaderingen van de afgeleiden van functies waarmee differentiaal vergelijkingen worden omgezet in een stel algebraïsche vergelijkingen,
- de toepassing van het superpositie-beginsel en de impuls-responsiefunctie.

Eerstgenoemde methode omvat vele malen meer rekenkundige bewerkingen dan de laatste methode. Om deze reden hebben wij van de laatste methode gebruik gemaakt, waaraan naderhand nog een verdergaande vereenvoudiging mogelijk bleek.

Het superpositie-principe kan kort als volgt worden geformuleerd: wanneer in een systeem een aantal veranderingen gelijktijdig plaatsvinden, kan men deze zo splitsen dat het net is alsof elke verandering onafhankelijk van de andere verloopt, en dat de totale verandering de som is van de effecten die het gevolg zijn van elk van de onafhankelijke veranderingen afzonderlijk.

Betrekt men dit principe op ons probleem dan betekent het dat:

- het gebouw dat een thermisch proces ondergaat onder invloed van fluctuerende weervariabelen als één systeem wordt beschouwd,
- de fluctuaties van de weervariabelen die in eerste instantie verantwoordelijk zijn voor veranderingen van de binnentemperatuur de onafhankelijke veranderingen zijn.

In de berekening van de binnentemperatuur zou men aldus in principe drie stappen kunnen onderscheiden:

- het ontbinden van de meteorologische belasting in de componenten die voor het thermische proces van belang zijn,
- het berekenen van het effect (de responsie) van het systeem op veranderingen van elk van de componenten,
- het sommeren van de responsies die het gevolg zijn van de afzonderlijke componenten.

Nader onderzoek heeft geleid tot de mogelijkheid om de meteorologische componenten niet afzonderlijk in de berekening te laten optreden, maar ze te combineren en te herleiden tot een zgn. equivalente temperatuur, waarmee de berekening veel vlotter kan verlopen. Dientengevolge kon het rekenmateriaal ook worden beperkt tot twee inputfuncties voor de meteorologische data en één responsiefunctie van het gebouw.

3. BEREKENINGSGRONDSLAG

Indien het gebouw als een lineair en invariant systeem wordt beschouwd geldt de volgende relatie tussen de input- en outputvariabele:

$$y(t) = \int_0^t v(t-\tau) h(\tau) d\tau$$

Hierin is $y(t)$ de binnentemperatuur (= output) en $v(t)$ de equivalente temperatuur (= input) op het tijdstip t . Voorts betekent $v(t-\tau)$ de inputwaarde op het tijdstip τ seconden vóór dit moment waardoor τ als het ware een 'ouderdomsvariabele' is. Met het toenemen van τ zal $v(t-\tau)$ een waarde van de inputvariabele zijn die steeds verder in het verleden ligt. Voor respectievelijk $\tau = 0$ en $\tau = t$ is $v(t-\tau)$ dus de inputwaarde op de momenten respectievelijk t en 0 . Bovenstaande vergelijking, ook wel convolutieintegraal genoemd, geeft aan dat de gehele voorgaande geschiedenis van de equivalente temperatuur $v(t)$ bijdraagt tot de vorming van de binnentemperatuur $y(t)$ op het tijdstip t .

$h(\tau)$ is de eenheidspuls-responsiefunctie van het onderzochte gebouwdeel (= systeem). Voor een numerieke oplossing van de convolutie-integraal met behulp van een digitale computer dienen de continue functies $v(t)$ en $h(t)$ eerst te worden omgezet in discrete functies, d.w.z. in tijdreeksen van een eindig aantal getallen die monsterwaarden zijn van de genoemde functies en die genomen worden met regelmatige tussenpozen van bijv. 1 uur. De integratie gaat aldus over in een sommatie van produkten van monsterwaarden van $v(t-\tau)$ en $h(\tau)$.

4. METEOROLOGISCHE DATA

Componenten uit de meteorologische belasting die in het thermische proces een fundamentele rol spelen bij de opbouw van de binnentemperatuur zijn:

- de droge boltemperatuur van de buitenlucht
- de intensiteit van de totaalstraling op een oppervlak
- de windsnelheid.

Meteorologische stations geven gewoonlijk wel uurwaarden op van de variabelen temperatuur en straling, maar voor de windsnelheid kan slechts een daggemiddelde worden afgeleid. Aangezien van de straling ook slechts waarden van de globale straling op een horizontaal vlak worden opgegeven, dienen de uurwaarden van de totaalstraling op verticale vlakken eerst daaruit te worden berekend. Met behulp van de genoemde data zijn tenslotte de uurwaarden voor de equivalente temperatuur berekend. Hiervoor is een afzonderlijk computerprogramma opgesteld.

5. EENHEIDSPULS-RESPONSIEFUNCTIE

Met de eenheidspuls-responsiefunctie wordt in dit geval be-

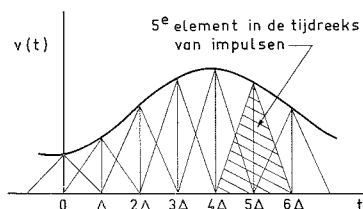


Fig. 1
Ontbinding van de inputfunctie $v(t)$ in elementaire impulsen

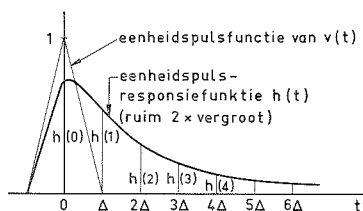


Fig. 2
Lokalisatie van bemonsteringsmomenten van de eenheidspuls-responsiefunctie $h(t)$ t.o.v. de eenheidspuls

Fig. 3
Temperatuureenheidspuls-responsiefunctie van een vertrek uit een gebouw van de categorie 'lichte bouwwijze'

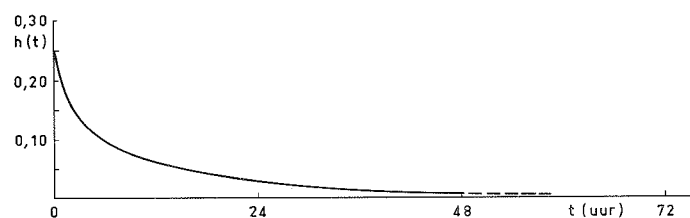
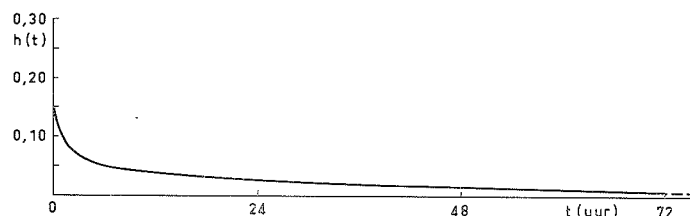


Fig. 4
Temperatuureenheidspuls-responsiefunctie van een vertrek uit een gebouw van de categorie 'zware bouwwijze'



doeld de responsie van de binnentemperatuur op de eenheidspulsfunctie van de equivalente temperatuur. De continu verlopende equivalente temperatuurfunctie (input-functie) wordt gedacht te zijn ontbonden in een opeenvolging van impulsen met een gelijkbenige driehoeksvorm waarvan de hoogte overeenkomt met de momentele waarde van de equivalente temperatuur (zie figuur 1). De monsterwaarde van elke term uit de tijdserie wordt zodoende gelijkgesteld aan het oppervlak van de driehoekspuls. Het midden van de basis van de impuls is de referentie voor het betreffende tijdstip, terwijl de basislengte tweemaal zo groot is als het tijdsinterval tussen 2 opeenvolgende monsterwaarden. De som van zo'n reeks elkaar overlappende driehoeken benadert de continue functie volgens rechte lijnstukken tussen de monsterwaarden. Hoe kleiner het interval tussen de bemonsteringen, hoe nauwkeuriger het resultaat zal zijn.

Deze wijze van ontbinding van het inputsignaal $v(t)$ in een opeenvolging van elementaire impulsen maakt het noodzakelijk dat de eenheidspuls-responsiefunctie $h(t)$ van het systeem niet slechts wordt opgegeven als een reeks waarden met dezelfde tussenpozen als voor $v(t)$, maar ook en vooral dat de bemonsteringsmomenten zeer precies worden gelokaliseerd ten opzichte van de eenheidspuls waarvan het midden van de basis van de driehoek het tijdstip $t=0$ markeert (zie figuur 2).

Het bepalen van de eenheidspuls-responsiefunctie geschiedde in ons geval met behulp van een elektrisch analoog model van het onderzochte gebouwvertrek. Voorbeelden van opgenomen eenheids-responsiefuncties van modellen van gebouwruimten treft men in figuur 3 en figuur 4 aan. Iedere functie bevat alle zakelijke informatie over de gebouwruimte: afmetingen, bouwmaterialen, ventilatievoorziening, zonweringssysteem, e.d. Deze functie hoeft daarom ook voor een bepaald object slechts éénmaal te worden bepaald.

6. PRINCIPE VAN DE REKENBEWERKINGEN

De bepaling van momentele waarden van de binnentemperatuur $y(t)$ volgt uit de oplossing van de eerder genoemde convolutie-integraal

$$y(t) = \int_0^t v(t-\tau) h(\tau) d\tau$$

of

$$y(t) = \int_0^t v(\tau) h(t-\tau) d\tau$$

waarin t als 'lopende variabele' optreedt.

Indien beide functies $v(t)$ en $h(t)$ continu zijn en grafisch zijn gegeven, wordt convolutie van de functies geïnterpreteerd op de wijze zoals de grafieken in figuur 5 dat successievelijk tonen.

Het komt er dus op neer om de functie $h(t-\tau)$ te spiegelen en over een afstand t_i naar rechts te verschuiven. Hierbij is t_i het tijdstip waarvoor men de y -waarde wenst te bepalen. Vermenigvuldiging van $v(\tau)$ en $h(t-\tau)$ levert tenslotte de laatste gra-

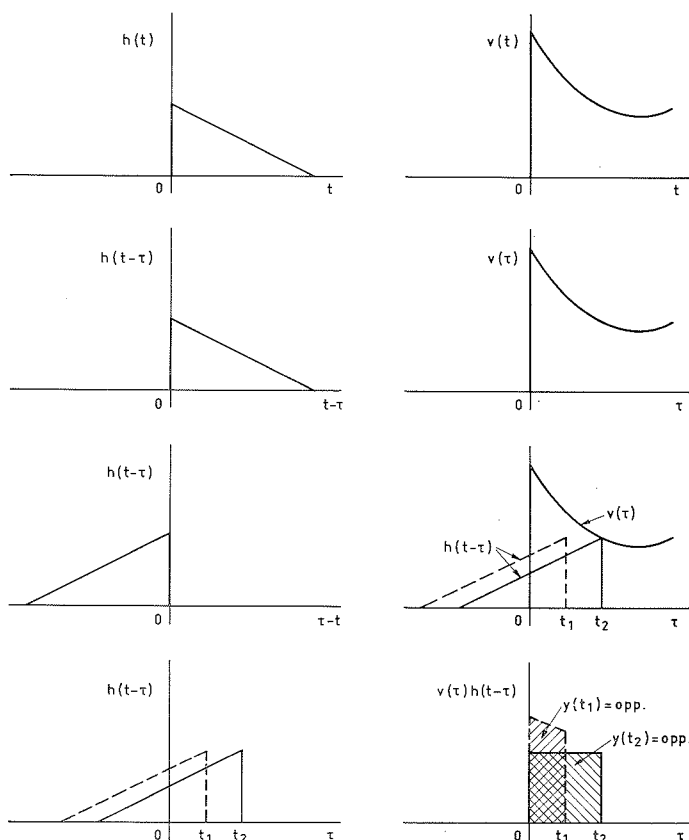


Fig. 5
Interpretatie van convolutie van de continue functies $v(t)$ en $h(t)$ indien beide functies grafisch bekend zijn. $y(t) = \int_0^t v(\tau)h(t-\tau)d\tau$: de waarde van $y(t)$ op de tijdstippen t_1 en t_2 is gelijk aan de respectievelijk gearceerde oppervlakken

fiek in figuur 5 op. De integraalwaarde is het gearceerde oppervlak onder deze kromme en derhalve de y-waarde voor die bepaalde waarde van t (in dit voorbeeld dus t_i). Voor ieder ander tijdstip wordt de y-waarde berekend door de functie $h(t-\tau)$ te verschuiven en weer het oppervlak te bepalen. In figuur 5 is dit aangegeven voor $i = 1$ en $i = 2$.

Indien de waarden van $v(t)$ en $h(t)$ zijn gegeven als tijdreeksen van getallen (bijv. uurwaarden van resp. equivalente temperatuur en impulsresponsiefunctie) komt convolutie op de volgende bewerking neer: de waarden van $y(t)$ worden gevonden door superpositie van de afzonderlijke systeemresponsies op elk van de pulsen waarin de inputfunctie $v(t)$ is ontbonden.

$$y(t_i) = v(t_i) \cdot h(0) + v(t_i - 1) \cdot h(1) + v(t_i - 2) \cdot h(2) + \dots$$

Onderstaand wordt dit aan de hand van een getallenvoorbeeld gedemonstreerd. Door de beginwaarde van $h(t)$ te plaatsen tegenover de waarde van $v(t)$ op het tijdstip t_i wordt de y-waarde op het tijdstip t_i berekend als de som van alle produkten van de getallenparen $v(t)$ en $h(t)$ die op één lijn liggen.

Rekenvoorbeeld
Illustratie van de berekening van de binnentemperatuur met een gefingeerde lineaire gebouwresponsie met behulp van convolutie van de functies $v(t)$ en $h(t)$ voor drie opeenvolgende tijdstippen

Tijdstip	Invoergegevens (data)					
	(aeq.) temp.	gebouw	(aeq.) temp.	gebouw	(aeq.) temp.	gebouw
τ	$v(t)$	$h(t-\tau)$	$v(t)$	$h(t-\tau)$	$v(t)$	$h(t-\tau)$
16 u	27,8° C		27,8° C		27,8° C	
15	28,0		28,0		28,0	0,190
14	27,5		27,5	0,190	27,5	0,170
13	26,5	0,190	26,5	0,170	26,5	0,150
12	25,0	0,170	25,0	0,150	25,0	0,130
11	23,3	0,150	23,3	0,130	23,3	0,110
10	21,5	0,130	21,5	0,110	21,5	0,090
9	19,6	0,110	19,6	0,090	19,6	0,070
8	17,6	0,090	17,6	0,070	17,6	0,050
7	15,7	0,070	15,7	0,050	15,7	0,030
6	13,9	0,050	13,9	0,030	13,9	0,010
5	12,2	0,030	12,2	0,010	12,2	0
4	10,7	0,010	10,7	0	10,7	
3	9,7	0	9,7		9,7	
2	10,0		10,0		10,0	

$$y(t_i) = \sum v(t_i - j) \cdot h(j), \text{ waarin } j = 0, 1, 2, \dots, 9, 10$$

$$\begin{aligned} y(t_{13}) &= (26,5 \times 0,190) + (25,0 \times 0,170) \\ &\quad + \dots + (10,7 \times 0,010) + (9,7 \times 0) = 21,6^\circ \text{ C} \\ y(t_{14}) &= (27,5 \times 0,190) + (26,5 \times 0,170) \\ &\quad + \dots + (12,2 \times 0,010) + (10,7 \times 0) = 23,2^\circ \text{ C} \\ y(t_{15}) &= (28,0 \times 0,190) + (27,5 \times 0,170) \\ &\quad + \dots + (13,9 \times 0,010) + (12,2 \times 0) = 24,6^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

Door iedere keer met de waardenreeks van $h(t)$ te schuiven zonder de rangnummervolgorde te wijzigen, worden y-waarden op andere tijdstippen bepaald. In het rekenvoorbeeld is de berekening uitgevoerd voor 3 tijdstippen.

7. BESPREKING VAN ENIGE STUDIEOBJECTEN

Van twee vertrekken met dezelfde afmetingen en configuratie die deel uitmaken van gebouwen met sterk uiteenlopende thermische eigenschappen, werd een elektrisch model samengesteld. Met deze analoge modellen van het vertrek zijn de impulsresponsiefuncties bepaald waarvan figuur 6 en figuur 7 enkele resultaten zijn. De elektrisch analoge modellen zijn zodanig samengesteld dat daarmee de beste benadering wordt verkregen van het beoogde thermische proces in de werkelijke situatie.

Aangezien de beschreven rekentechniek op een dusdanige wijze wordt toegepast, dat de impulsresponsie in feite een zgn. overall responsiefunctie van het vertrek is, zijn voor de

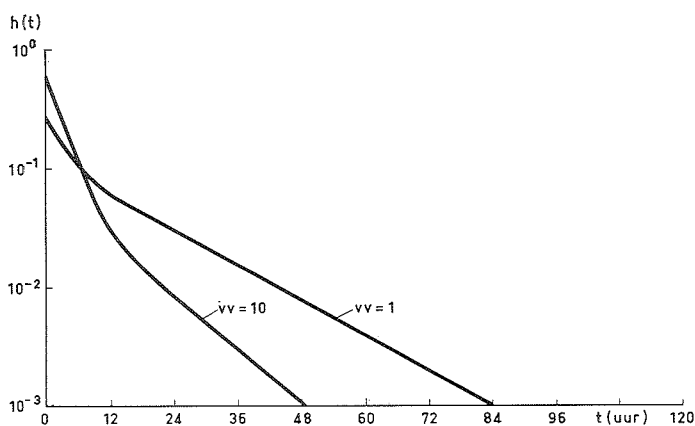


Fig. 6
Impulsresponsiefunctie van een vertrek uit een gebouw met relatief kleine warmtecapaciteit. Het ventilatievoud is van 1 naar 10 gebracht

Effect:

- weersveranderingen hebben een grotere invloed
- de invloed van de voorgeschiedenis van weertoestanden is in tijdslengte verkleind van ca. 84 u. naar 48 u

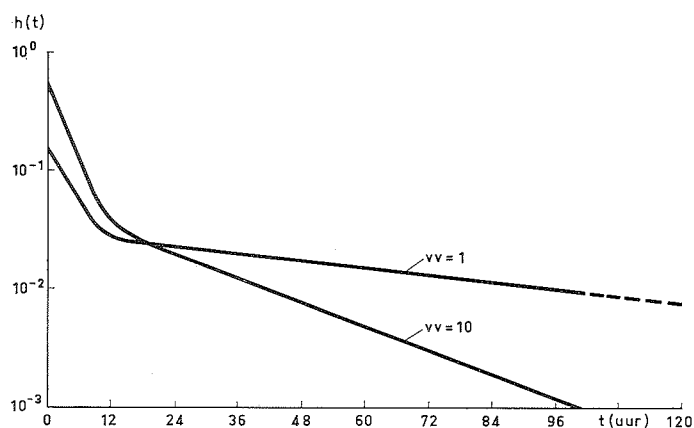


Fig. 7
Impulsresponsiefunctie van een vertrek uit een gebouw met grote warmtecapaciteit. Het ventilatievoud is ook in dit geval van 1 naar 10 gebracht

Effect:

- weersveranderingen hebben een grotere invloed
- de invloed van de voorgeschiedenis van weertoestanden is zeer ingrijpend verkleind van een tijdslengte van $>> 5$ etmalen tot nog ca. 100 u

systeembestudering meerdere responsiefuncties per vertrekmodel opgenomen. De overall responsiefunctie van het vertrek wijzigt zich namelijk bij verandering van ventilatievoud en/of zonwering-lokalisatie. Deze wijzigingen zijn duidelijk merkbaar in de grafische voorstelling van de genoemde functies (zie figuur 6 en figuur 7). Met dergelijke systeemresponsiefuncties zijn niet slechts kwalitatieve gedraganalyses mogelijk, doch via de oplossing van de beschreven convolutie integraal is de responsie van het thermische systeem op willekeurige inputsignalen te berekenen.

Met behulp van enige responsiefuncties die op beide genoemde vertrekken betrekking hebben en een pakket meteorologische data uit een 6-maandelijkse periode van mei t/m oktober 1966 zijn berekeningen gemaakt van de dagelijkse gang van de luchttemperatuur in de vertrekken. De meteorologische data zijn ingevoerd in de oorspronkelijke sequentie als één ononderbroken reeks. Voorts zijn van de resultaten de frequenties van overschrijding afgeleid voor de temperatuur-drempelwaarden van 24°C en 26°C . In deze tekst zullen de resultaten niet worden vermeld, doch in de voordracht zullen deze wel worden getoond en nader worden toegelicht.

8. NABESCHOUWING

De resultaten uit de eenvoudige voorbeelden hebben duidelijk aangetoond dat de beschreven methode zeer bruikbaar is, mede doordat deze een praktisch uitvoerbare procedure bevat om op betrouwbare wijze lange-termijn-voorspellingen te doen ten aanzien van bepaalde waarde-overschrijdingen van de luchttemperatuur in gebouwruidten. Op identieke wijze kunnen ook koel- en verwarmingslastgegevens worden verzameld die vooral voor lange-termijn-beschouwingen reken-technisch eenvoudig uitvoerbaar zijn, zelfs met een digitale computer met beperkte capaciteit.

De ingewikkelde statistische analyse van de stochastische meteorologische variabelen is dan niet langer essentieel.

Een voor de ontwerper belangrijke eigenschap is nog dat het bezit van nauwkeurig bepaalde impulsresponsiefuncties van een referentievertrek uit zijn gebouwontwerp hem in staat zal stellen het thermisch gedrag van de betreffende ruimte te toetsen aan willekeurige meteorologische belastingtoestanden. Door afwisselend data in te voeren die voor diverse geveloriëntaties gelden kan het effect van de vensteroriëntatie op de binnentemperatuur in korte tijd worden onderzocht. In omgekeerde zin is het mogelijk om de gunstigste bouw- en klimaattechnische samenstelling te bepalen voor een vertrek met vaste geveloriëntatie door slechts een keuze te maken uit het karakteristieke verloop van diverse bekende impulsresponsiefuncties.

Ofschoon impulsresponsie-karakteristieken in het algemeen de mogelijkheid bieden om op exacte basis diverse ontwerpen met elkaar te vergelijken, moet in verband met het overal karakter van de hier gegeven functies worden opgemerkt dat deze sterk zijn gericht op de berekening van de binnentemperatuur. Zou men bijvoorbeeld ook geïnteresseerd zijn in de oppervlaktetemperatuur van de afzonderlijke omwandingsdelen van het vertrek, dan blijft een omvangrijker rekenprocedure voor het thermische procesgedeelte onvermijdelijk.

