Landbrugsministeriet
Statens Planteavlsforsøg

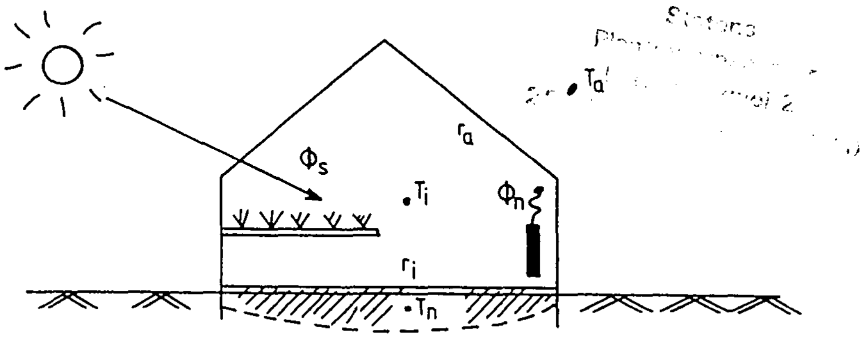
Flerfaktor styring af væksthuses energitilførsel

Afdeling for Biometri og Informatik
2800 Lyngby

Tidsskrift for Planteavls Specialserie

Beretning nr. 2156 - 1991

FLERFAKTOR STYRING AF VÆKSTHUSES ENERGITILFØRSEL



$$
\begin{bmatrix} dT_m \\ dT_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_i C_m} & \frac{1}{R_i C_m} \\ \frac{1}{R_i C_i} & \frac{1}{C_i}(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_i}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_m \\ T_i \end{bmatrix} \times dt
$$

$$
+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_a C_i} & \frac{A_r}{C_i} & \frac{1}{C_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_a \\ \phi_s \\ \phi_h \end{bmatrix} \times dt + \begin{bmatrix} dv_m \\ dv_i \end{bmatrix}
$$

$$
\nabla T_t = \mu + \frac{\omega_0 + \omega_1 B}{1 + \delta_1 B + \delta_2 B^2 + \delta_3 B^3} \cdot B \cdot \nabla PR_t
$$

$$
+ \frac{\tilde{\omega}_0 + \tilde{\omega}_2 B}{1 + \tilde{\delta}_1 B + \tilde{\delta}_2 B^2} \nabla G_t + \frac{1 - \theta_1 B}{1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3} \cdot a_t
$$

Carsten Henrik Wachmann
Klaus Juel Olsen
Kristian Kristensen
Annette Ersbøll

Afdeling for Biometri og Informatik

Henrik Madsen
Mogens Lynnerup

Institut for Matematisk Statistik og Operationsanalyse

Otto Frøsig Nielsen
Marius Amsen
Laboratoriet for Gartneriteknik

Steen Traberg-Borup
Statens Byggeforskningsinstitut

JULI 1991

Indholdsfortegnelse

Figurfortegnelse

Tabelfortegnelse

Kapitel 1

Indledning

There was a young man of Japan
whose verses would never scan.

Yes, he said, I know
this is really so
because I always try to put as many words into the last line as I possibly can.

LimErik

Hovedsigtet med dette projekt er, ved hjælp af en bedre temperatur regulering, at kunne reducere energiforbruget i væksthuse. *I almindelighed regnes der i Danmark med, at udgifterne til energi i et kommercielt væksthus-gartneri udgør omkring 20% af omsætningen.* Selvom energiforbruget efter de to oliekriser er blevet nedbragt en del i kraft af almindelige isolerings foranstaltninger vil der stadig være meget at hente ved en bedre styring af energi tilførelsen. Derudover vil man ofte, hvis energien hentes fra et fjernvarmeværk, udover forbrugte m^3-vand (eller forbrugte antal calorier), skulle betale for retten til at belaste systemet op til en vis "spidsbelastnings-grænse". Denne ekstra omkostning udgør en væsentlig del af energi-budgettet og det er derfor af vigtighed at kunne sætte sin "spidsbelastnings-grænse" så lavt så muligt.

Den forbedrede styring tænkes at foregå ved at udnytte nye muligheder for at lade klimacomputere styre energitilførsel, ventilation og skygge gardiner. Derimod er tilførsel af CO_2 og kunstlys ikke inddraget, for ikke at gøre opgaven for omfattende. Styringen vil være digital og baseret på målinger og forudsigelser af ude- og indeklima. Endvidere vil styringen være baseret på avancerede matematisk-statistiske modeller.

Det er hensigten at benytte selvregulerende styring, således at programmelet selv foretager en tilpasning til et konkret væksthus. Ligeledes vil det selv tilpasse sig ændrede vilkår, som f.eks. når planterne, ved salg, skiftes ud.

Metoden er rettet mod at forbedre reguleringen i eksisterende væksthuse, og kan ikke benyttes til at designe nye væksthuse.

Man kan betragte klima, væksthus og styring af energitilførsel som et samlet system. Men for at overskue problemstillingen er det nødvendigt i første omgang at bryde den op i tre dele. Der skal derfor i første omgang udvikles en model på hvert af disse tre delområder.

- Modellen for det udendørs klima skal, på baggrund af nuværende og fortidige målinger af klimavariable, kunne forudsige klimaet et stykke tid frem.
- Model nummer to skal beskrive væksthusets varmedynamik. Det er grundlæggende for de benyttede metoder at man netop skal beskrive det dynamiske aspekt af varmeforholdene. Hvis man nøjes med en statisk betragtning er det ikke muligt at vide hvor hurtigt væksthuset vil reagere på ændrede ydre vilkår. Denne viden er uundværlig, hvis man skal finde en optimal regulering. Der er i dette forprojekt udviklet foreløbige modeller for udeklima og væksthusdynamik. Modellerne er udviklet på data fra forsøg ved Årslev (IfV).
- Den tredie model omhandler strategier for regulering af varmetilførslen. Denne problemstilling har ikke været behandlet udførligt i dette projekt.

Hele systemet kommer så, i grove træk, til at virke ved, at klimamodellen først forudsiger udeklimaet f.eks. en time frem i tiden. På baggrund af det prognosticerede udeklima beregnes væksthusets indetemperatur en time frem ved uændret energitilførsel, under anvendelse af modellen for væksthuses varmedynamik. Er denne fremskrevne indetemperatur nu f.eks. højere end den ønskede kan der så allerede nu foretages en formindskelse af energitilførelsen.

Endelig kan man, ved hjælp af en given regulerings strategi, afveje plantekomfort mod energiomkostninger. Hvis man således er villig til, midlertidigt at lade indetemperaturen falde lidt under den optimale plantetemperatur, vil det være muligt at opnå en yderligere energi-reduktion.

Systemet forventes at have særlig stor betydning ved pludselige, men forudsigelige, skift i udeklimaet, som f.eks. ved solopgang. Idag betyder regulering efter en sætpunkt-temperatur, at der ofte lige før solopgang bruges en masse energi på opvarmning. Ikke så lang tid efter, når solen begynder at skinne, må energien bortventileres som overskudsvarme.

De praktiske forudsætninger for at de beskrevne tanker kan føres ud i livet er i vid udstrækning allerede idag til stede i gartneri erhvervet. Ved mange gartnerier måles de relevante udendørs klimavariable såsom temperatur, stråling, vind og regn. Indendørs måles temperatur og luftfugttighed. Endvidere har mange gartnerier allerede idag en klimacomputer, der registrerer disse variable, og foretager en styring, blot ikke efter så avancerede metoder som de i dette projekt undersøgte.

1.1 Rapportens indhold.

Rapporten falder i tre hoveddele.

1. En gennemgang af den tekniske baggrund:

   Kapitel 2 og 3 i rapporten giver en generel beskrivelse af væksthuses konstruktion, varmesystemer og den deterministiske temperatur-regulering med analog teknik, sådan som den foregår idag.

2. En gennemgang af den statistiske baggrund:

   Kapitel 4 er en gennemgang af de matematisk-statistiske teorier, som benyttes i de senere dele af rapporten. Det er et relativt teoretisk kapitel. Hvis man er villig til at springe de matematiske detaljer over, vil det i store træk være muligt at forstå de senere kapitler uden at have læst kapitel 4. Kapitlet falder i tre dele:

   Først diskuteres varmedynamiske modeller for et væksthus, uden hensyntagen til stokastik. Modellerne opskrives som lineære systemer af ordinære differentialligninger.

   Dernæst tilføjes stokastiske led, og man får de såkaldte lineære stokastiske tilstandsmodeller.

   Endelig er de generelle tidsrække modeller undersøgt.

3. En beskrivelse af de udførte forsøg, analyser og fundne modeller:

   Kapitel 5 beskriver den foreløbige klimamodel der er beregnet på data fra Årslev, vinteren 1988/89. Klimaet beskrives ved en tidsrækkemodel med tidstrin på en time, svarende til samplingstiden for de indsamlede data.

   Kapitel 6 omhandler udviklingen af de to forskellige modeltyper til beskrivelse af væksthusets korttids varmedynamik: tilstandsmodeller og tidsrækkemodeller. De data, der ligger til grund, stammer fra et designet forsøg udført på et eksperimental væksthus ved Årslev. Samplingstiden har været 2 minutter.

   Kapitel 7 omhandler nogle foreløbige overvejelser af, hvilke reguleringsstrategier det vil være hensigtsmæssigt at anvende. Disse er medtaget for at give en afrundet beskrivelse af det samlede system, som består af korttids prognose modeller, modeller for væksthusets varmedynamik og reguleringsystemet.

Endelig indeholder kapitel 8 sammendrag og konklusion.
I Appendix A og B er organisationen bag dette projekt, og planerne for en fortsættelse af det, beskrevet.

Dette projekt bygger naturligvis på tidligere indsats fra mange kanter. Her i landet har der været arbejdet en del med energi-spørgsmål i forbindelse med væksthuse. En opsummering foreligger i publikationen [Strøm et al.,1987] fra Statens Byggeforskningsinstitut. Den i første omgang mere teoretiske indfaldsvinkel, der ligger bag denne rapport, har ikke været anvendt meget i Danmark. Et vigtigt arbejde i denne forbindelse er [Udink ten Cate, 1983], der indeholder mange resultater, dels inden for avanceret klimastyring i almindelighed og dels inden for området "væksthusets varmedynamik".

Kapitel 2

Væksthuse og energi

En samlet reference for dette afsnit er [Nielsen et al., 1980], der er den eneste generelle oversigt på dansk over væksthuse og væksthus-teknik.

2.1 Beskrivelse af væksthuset

Væksthuset er et dyrkningsrum, hvori klimaet søges behersket, således at der kan skabes de bedst mulige vækstbetingelser for de kulturer, der skal dyrkes i det.

De klimafaktorer, som væksthusets konstruktion og udformning har indflydelse på, er lys- og varmestråling, temperatur, luftfugtighed og luftbevægelse.

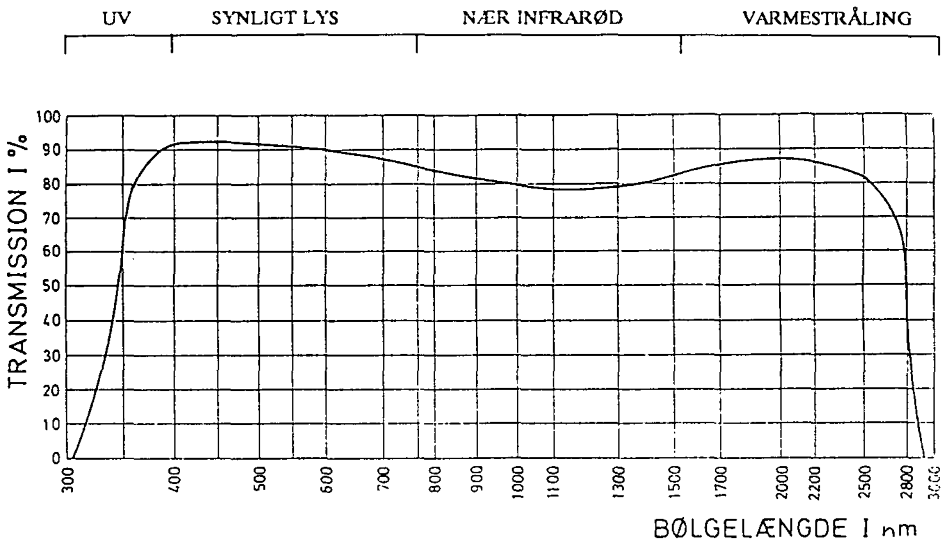
2.1.1 Lysindstråling.

Den klimafaktor, der må lægges mest vægt på ved væksthusets udformning og konstruktion, er lyset.

Når lyset træffer en glasrude vil en del af lyset reflekteres, en del vil absorberes og resten vil passere gennem glasset. Hvor meget, der reflekteres, afhænger af lysets indfaldsvinkel. Ved stråling vinkelret mod en glasflade (indfaldsvinkel = 0°) er reflektionen for hver side af glasset ca. 4%, altså ialt ca. 8%. Absorptionen kan variere fra 1.6 til 2.5% afhængig af glassets sammensætning. Lys- og varmetransmissionen er ikke ens for alle bølgelængder, se figur 2.1.

Med hensyn til lysindstrålingen er den væsentligste forskel på de enkelte hustyper, at den indstråling, der tilføres gennem tremplen (vægfladerne), pr. arealenhed, er større i smalle huse end i brede, idet indstrålingen gennem tagfladen praktisk taget er ens for alle hustyper. Det gælder dog kun når solhøjden er større end taghældningen. Er solhøjden lavere, er indstrålingen noget mindre i blokhuse end i fritliggende huse.

I gennemsnit regner man med, at ca. 2/3 af den stråling, der rammer et væksthus, slipper indenfor. Heraf vil omkring halvdelen bindes som latent varme ved fordampning (forudsat, at der er planter i huset). En fjerdedel vil forlade huset igen, og den sidste fjerdedel vil gå til forøgelse af luftens temperatur.



Figur 2.1: Transmission af lys- og varmestråling gennem maskinglas i afhængighed af bølgelængden.

2.1.2 Væksthusets form.

Taghældning.

Den almindeligste taghældning for væksthuse er 25 – 27°. Typiske danske væksthuse har en taghældning på 25.6°. Det tyske normvæksthus har en taghældning på 26.5°. Længere mod nord bruges ofte en taghældning på 30 – 33° og i Sydeuropa 22 – 23°.

Trempel.

Trempelhøjden (langvæggens højde) vil normalt være mindst 2.25 m svarende til 2 1/2 rude på 90 cm's længde. Til visse kulturer f.eks. tomater kan en trempelhøjde på 2.70 m være hensigtsmæssig. I en Venlo-blok (væksthus af Hollandsk oprindelse), se figur 2.2, til tomater og agurker vil trempelhøjden ofte være noget højere.

Jo højere tremplen er, desto større vil lysindfaldet blive, især i vinterhalvåret, men samtidig øges byggeomkostningerne og brændselsudgifterne.

Danske hustyper.

Der findes ingen officiel dansk standard for væksthuse, men størstedelen af dansk væksthusbyggeri foregår dog efter så ensartede retningslinier, at der i praksis er tale om visse standardtyper. Disse er karakteriserede ved bredder på 12, 16, 20, 24 ell. 25

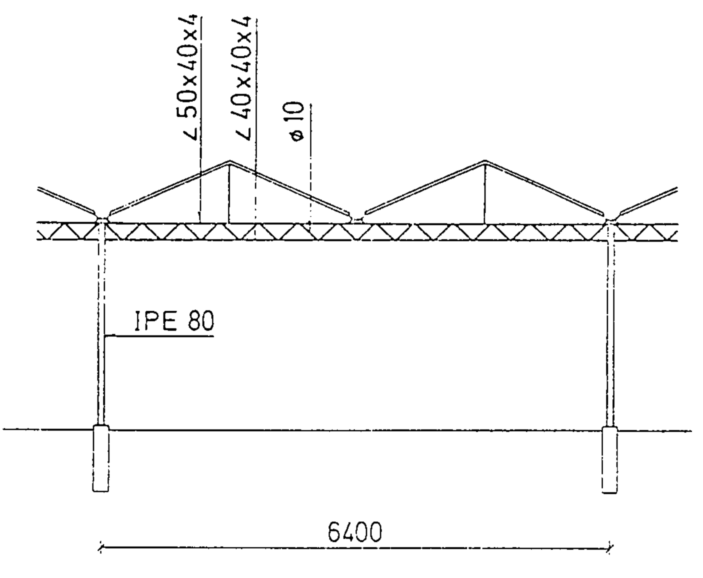
m. Væksthusene kan være fritliggende eller sammenbyggede i blokke på 2 ell. flere enheder, se figur 2.2.

Tyske hustyper.

I Vesttyskland er væksthuses bredde betinget af et DIN normeret breddemodul på 3.065 m. Det mest anvendte normvæksthus består af 4 breddemoduler svarende til en bredde er 12.26 m. Der bygges ofte i blokke.

Hollandske hustyper.

De hollandske såkaldte Venlo-huse, der på grund af deres prisbillighed har fået stor udbreddelse både i og uden for Holland, har et breddemodul på 3.20 m. Afstanden mellem søjlerækkerne kan være 3.20, 6.40 ell. 9.60 m, se figur 2.2.

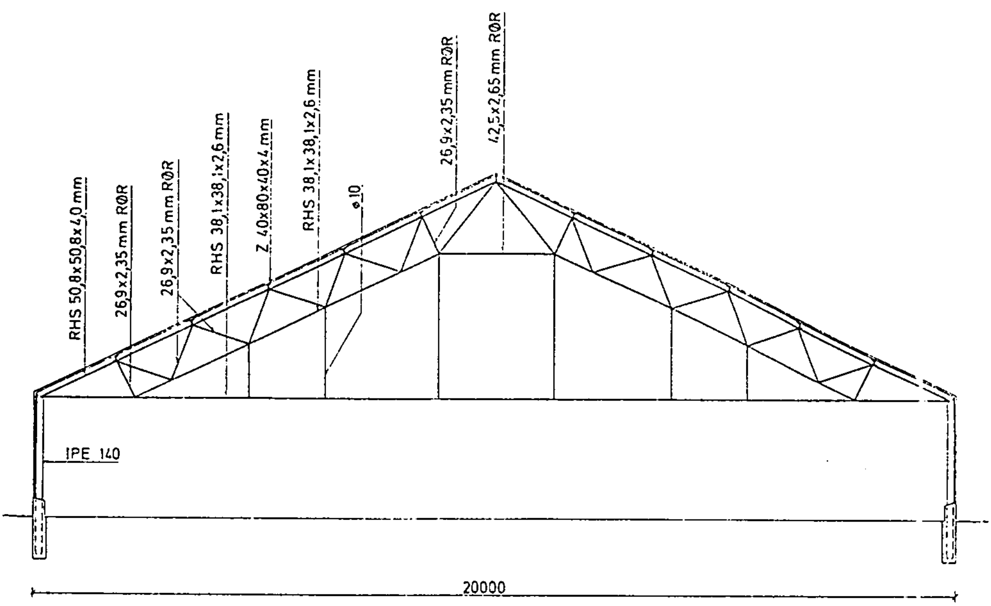


Figur 2.2: Venlo-blok. 6.40 m fagbredde. Søjleafstand 3.00 m.

2.1.3 Væksthusets konstruktion.

Den bærende konstruktion udformes således, at skyggevirkningen bliver mindst mulig. Konstruktionen kan udføres af stål eller aluminium. Her i landet anvendes kun stål, da aluminium hidtil har været for dyrt.

Konstruktionen i de danske væksthuse kan enten være en gitterspær- eller en rammekonstruktion.



Figur 2.3: 20 m bredt væksthus med gitterspærkonstruktion. Spærafstand 4.06 m.

Gitterspær udføres af almindelige cirkulære rør, firkantrør eller specielle tyndpladeprofiler. De opstilles på søjler af I- eller H-profiler eller specielle tyndpladeprofiler, der indstøbes i eller boltes fast til fundamentet.

Rammekonstruktioner udføres af sammensvejste I-profiler. Jernforbruget til en gitterkonstruktion er mindre end til en rammekonstruktion, til gengæld er omkostningerne ved fremstillingen større.

Til understøtning af sprosserne anvendes åse af stål eller aluminium. Der findes talrige aluminiumprofiler specielt konstrueret til formålet.

Dækkematerialet (glas eller kunststofplader) oplægges på sprosser. Af hensyn til lysindfaldet vil de ofte være meget smalle. Sprosser kan udføres af træ, stål, aluminium og plast. Der anvendes fortrinsvis aluminiumsprosser i Skandinavien.

Eftersom en aluminiumsprosse kan gives enhver tænkelig form, findes der et meget stort antal sprosseprofiler på markedet. Der benyttes forskellige metoder til fastholdelse af glasset nemlig: kit og glasklemmer af rustfrit stål, kit og dæklister af aluminium samt kitløs oplægning med dæklister af neopren. Til huse af Venlo-typen er sprosserne ofte forsynet med en not svarende til glassets tykkelse, og der anvendes hverken kit eller glaslister.

Luftvinduer fremstilles af samme materiale som sprosserne, men det bedst egnede er aluminium. I danske væksthuse anvendes kun gennemgående luftvinduer løbende i hele husets længde langs tagryggen. I Venlo-huse anvendes enkelte vinduer i en, to eller tre sprossefags bredde. I Danmark er det mest anvendte system gennemgående vinduer med tandstangsopluk, hvor tandstængerne er af aluminium og drivakselen af galvaniseret rør.

2.1.4 Dækkematerialer.

Glas.

I de nordiske lande bruges kun almindeligt vinduesglas (blankglas). I udlandet, især i Tyskland og Holland, bruges i stor udstrækning det såkaldte klarglas (råglas). Klarglas er ugennemsigtigt, idet det er glat på den ene side og ujævnt på den anden side. Det spreder derfor lyset mere end almindeligt vinduesglas.

En glasdimension på 900 x 800 x 3.8 mm er den mest anvendte her i landet. Ved gavlene anvendes der i trempel og tag glas i en smallere bredde. Dette gøres på grund af større belastninger fra vind og evt. sne.

Kunststofplader.

Siden energikriserne har der i større eller mindre udstrækning været anvendt kunststof plader i stedet for glas som dækkemateriale. Pladerne lægges op i aluminium sprosser på samme måde som glas, dog ofte i bredder på 1200 mm og længder svarende til tagfladens bredde og tremplens højde, således at man får en hel plade.

Pladerne er fremstillet af akryl (plexiglas) eller polykarbonat i tykkelser fra ca. 8 - 16 mm. Pladerne fremstilles i form af kanalplader (ribbeplader), se figur 2.4.

Lige efter energikriserne benyttede man udelukkende kanalplader, men da kanalpladernes lystransmission ligger på ca. 80% mod glassets ca. 90% fik man for lidt lys til visse kulturer, hvorfor man i dag kun benytter kanalplader i trempler og gavle.

2.2 Varmeanlæg og temperaturkrav

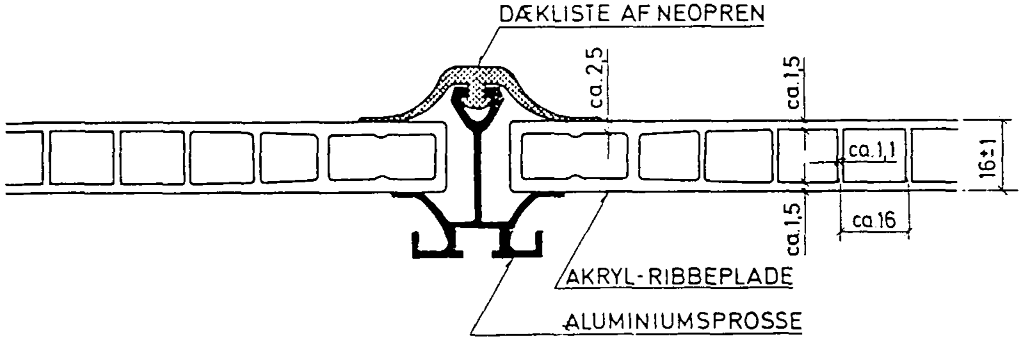
2.2.1 Varmetab

Formålet med varmeanlægget i et væksthus er i første række at opretholde den for kulturerne nødvendige temperaturtilstand, men desuden benyttes varmeanlægget i visse perioder alene til at regulere luftfugtigheden og til at fremme luftcirkulationen.

Som mål for temperaturtilstanden i et væksthus benyttes luftens temperatur målt i °C selv om det er åbenbart, at lufttemperaturen alene ikke giver et sandt udtryk for planternes virkelige temperaturtilstand.

I et væksthus vil varmestrålingen, enten den virker i positiv eller negativ retning for væksthusets varmebalance, have overordentlig stor indflydelse på luftens og planternes temperaturtilstand.

Varmetabet fra et rum sker gennem den omliggende skal og fordeler sig mellem ledning, konvektion, stråling, fordampning eller fortætning og ventilation (fugetab). Beregningen af et rums varmetab sker på grund af de omgivende fladers U-værdier (varmetransmissionskoefficienter, tidligere kaldet k-værdier). U-værdien angiver den samlede varmetransmission gennem 1 m^2 af den samlede vægkonstruktion ved en temperaturforskel på 1 °C mellem de to sider af væggen. U-værdien angives i $W/m^2{}^oC$.



Figur 2.4: Kanalpladen leveres i 8 eller 16 mm tykkelse og i bredder på 600 eller 1200 mm. Standardlængder på 2, 4 eller 6 m eller efter ønske.

For et almindeligt væksthus med enkelt lag glas og god vedligeholdelse af fuger, glaskitning, døre og vinduer kan der dimensioneringsmæssigt regnes med en U-værdi på 7.6 W/m^2°C.

Ledningstab sker mellem dele, der berører hinanden og *konvektionstab* sker i en strømmende væske eller luftart, hvor væskedelene undervejs afgiver varme ved ledning til andre væskedele.

Ved faste begrænsningsflader sker konvektionen ved at væskedelene, der berører det faste legeme, opvarmes og transporterer den optagne varme væk, og denne form for varmeoverføring ved en fast flade kaldes varmeovergang.

Ved konvektion skelnes mellem fri strømning eller termisk varmestrømning, når strømningen alene forårsages af de vægtfylde forskelle, der er en følge af temperaturforskellene, og tvungen strømning, når den udefra påtvungne strømning er dominerende. *Strålingstab* sker, når et legeme eller en flade udsender varme i form af strålingsenergi i rummet. Når denne strålingsenergi træffer et andet legeme, opvarmes det. Strålevarme sker ved bølgelængder mellem 1550 og 40000 nm (langbølget stråling) afhængig af de strålende fladers temperatur. Fordampning sker, når et vådt legeme tørrer. Ved en våd flade bruges varme til tørringen. Dette varmeforbrug vil nedsætte overfladetemperaturen og hermed forøge varmetabet. Fugetab er et udtryk for det luftskifte, der vil være ved alle utætheder i en flade (omkring vinduer og døre, glasoverlæg i væksthuse, rørgennemføringer m.v.).

2.2.2 Varmeforbrug

Den varmemængde, der skal til for at opretholde den ønskede temperaturtilstand, som i mangel af bedre defineres ved lufttemperaturen, er afhængig af forskellen mellem temperaturerne i væksthuset og i det frie samt af væksthusets ydre begrænsningsfladers areal og af disses isoleringsevne. Varmeforbruget kan med en for praksis tilstrækkelig nøjagtighed (se e.v.t. afsnit 4.1.2) beregnes efter følgende formel:

$$\phi = U^{DS} A(T_i - T_u),$$

hvor

- ϕ = varmeforbrug (varmetab) i Watt.
- A = areal i m^2 af væksthusets yderflader (tag, trempel og gavle).
- U^{DS} = yderfladernes varmetransmissionskoefficient i W/m^2oC.
- T_i = temperaturen i væksthuset.
- T_u = temperaturen i det frie.

Betragtes væksthusets glasareal som en homogen flade med samme U-værdi, vil U-værdiens størrelse være afhængig af temperaturforholdende, af lufthastigheden på begge sider af glasfladen, af varmeanlæggets placering (i forhold til glasfladen) og udformning, af sprossearealet i forhold til glasarealet, af sprossematerialet (træ, aluminium, stål) og af utætheder ved glasoverlæg, vinduer m.m., hvorimod glastykkelsen i praksis er uden betydning. U-værdien kan derfor variere meget fra dag til dag og fra sted til sted.

Dimensioneringstemperaturerne i væksthuset og i det fri, T_i og T_u, må fastsættes under hensyntagen til, hvilke kulturer huset skal anvendes til, og på hvilken tid af året de skal dyrkes.

Da de ugunstigste forhold normalt indtræffer om natten, fastsættes lufttemperaturen i væksthuset, T_i, som den temperatur den pågældende kultur kræver om natten. Hvis kulturens temperaturkrav varierer med årstiden, vælges den temperatur, som er nødvendig på den årstid, hvor de laveste temperaturer i det fri kan forekomme.

Hvis andet ikke er givet regnes der normalt med, at varmeanlægget skal dimensioneres til at kunne holde en minimums indetemperatur på +18 °C ved en udetemperatur på -12 °C, altså en temperaturdifferens på 30 °C. Fastsættelsen af den udvendige dimensioneringstemperatur må i nogen grad bero på et skøn, ved hvilket der tages hensyn til såvel de foreliggende statistiske oplysninger om landets klima som kulturens værdi, og hvor lange kuldeperioder der kan forventes på den årstid, hvor den pågældende kultur skal dyrkes.

Almindeligvis vil det ikke være økonomisk forsvarligt at dimensionere varmeanlægget således, at den ønskede temperatur vil kunne opretholdes ved den lavest tænkelige udetemperatur. Det vil være nødvendigt at tillade en vis afvigelse fra den ønskede temperatur under særligt ugunstige forhold. Hvor lange og hvor store temperaturfald der kan tolereres, vil afhænge af kulturerne.

2.2.3 Varmeanlægget

Ved valg af det rette opvarmningssystem og den rette placering af varmefladerne kan der gøres meget for, at varmen bliver afgivet der, hvor der er brug for den. Afgivelse af varme kan ske ved ledning, stråling og konvektion.

Ledningsvarme er varmen, der overføres direkte fra varmemediet, f.eks. varmeslanger, nedgravet i jord, til opvarmning af jorden.

Strålingsvarme er varmen, der overføres ved udstråling fra en varmeflade, f.eks. fra et varmerør til kultur og glas eller fra kultur til glas. De egenskaber, der kan have interesse er emission (stråleudsendelse) og absorption (stråleoptagelse). Disse egenskaber er afhængige af overfladens beskaffenhed og form.

Konvektionsvarme er varme, der overføres til den omkring-liggende luft og herfra, enten ved naturlig eller mekanisk cirkulation, forplanter sig ud i rummet. F.eks. varme fra rør under borde eller fra en varmluftovn (kalorifer).

Anlægget

Vandvarmeanlæg er det alt dominerende, og under de nuværende forhold må det karakteriseres som det bedst egnede væksthusvarmeanlæg. Fordelene ved et vandvarmeanlæg sammenlignet med f.eks. et dampvarmeanlæg er, at anlæggets varmeafgivelse kan reguleres ved at variere temperaturen på varmefladerne (varmerørene), at temperaturreguleringen forholdsvis let kan automatiseres, og at varmefladerne kan placeres, hvor det tjener kulturerne bedst uden hensyn til højdeforskelle og uden risiko for, at strålevarmepåvirkningen bliver for stor.

I vandvarmeanlæg sker varmetransporten fra kedelanlægget til forbrugsstedet som navnet antyder med vand, der cirkulerer gennem kedel og varmeflader. I alle moderne anlæg tilvejebringes cirkulationen med cirkulationspumper.

Forudsætningen for, at anlægget kan fungere tilfredsstillende er, at hovedledninger og cirkulationspumper er dimensioneret således, at vandcirkulationen gennem det enkelte varmerør svarer nøje til varmebehovet. Det kan i praksis være et ret omstændeligt arbejde, at dimensionere et vandvarmeanlæg nøjagtigt.

2.2.4 Varmeflader

Jernrør

Den mest anvendte form for varmeflade i væksthuse er runde jernrør i dimensionerne 25 og 32 mm, men også firkantrør eller andre former anvendes. Aluminiumrør med forskelligt udformede finner anvendes også, dog mest ved fjernvarmeforsynede gartnerier.

Hvor store mængder varmerør der findes i væksthuset for at tilføre den nødvendige varmemængde afhænger af væksthusets varmebehov, af varmerørets U-værdi og overfladeareal, af cirkulationsvandets middeltemperatur og den ønskede lufttemperatur.

Typisk vil jernrør afgive omkring 12 Watt pr. grad pr. m^2 overflade, og ved spidsbelastning (hvor rør-temperaturen er omkring 90°C, og lufttemperaturen omkring stuetemperatur) er varmeafgivelsen af størrelsesordenen 100 Watt pr. løbende meter rør.

Kedelvandets fremløbstemperatur kan for almindelige varmtvandsanlæg sættes til 90 °C og returtemperaturen sættes normalt til 75 °C, men kan ved meget udstrakte anlæg være på 70 °C. Det samme er tilfældet, hvis el-prisen er meget høj. Når returtemperaturen sænkes, mindskes udgifterne til hovedledninger, cirkulationspumper og el-kraft. Til gengæld vokser udgifterne til varmeinstallationen i selve væksthuset, fordi rørmængderne må forøges.

Af såvel varmetekniske som økonomiske grunde bør der anvendes så små rørdimensioner som teknisk og praktisk muligt. Jo mindre dimensioner der anvendes, desto mindre bliver vandindholdet i anlægget. Når anlægget arbejder under konstante forhold, er det ligegyldigt, om vandindholdet er stort eller lille. Men så snart der sker en ændring af varmebehovet, er det af stor betydning for anlæggets evne til at følge med det ændrede behov, at vandindholdet er så lille som muligt.

PEL-rør

Til varmerør, nedgravet i jord eller, hvor varmerørene er særligt udsatte for gødningsvand, anvendes PEL-rør. De mest anvendte dimensioner er udv. diameter 16, 20 og 25 mm. Hvilke dimensioner, der anvendes, afhænger af rørenes længde og cirkulationspumpens løfte-højde. PEL-rør kan ikke anvendes ved vandtemperaturer højere end 60 °C, da det tilladelige arbejdstryk falder kraftigt med stigende temperatur.

2.2.5 Varmeanlæggets placering

Væksthusets indretning og kulturarten er tit afgørende for, hvilket opvarmningssystem eller kombination, der anvendes.

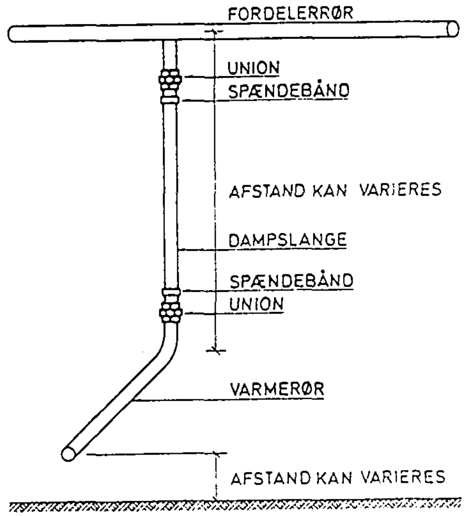
Jordvarme

Til opvarmning af jord benyttes udelukkende nedgravede PEL-rør. Jordtemperaturen ved overfladen er afhængig af jordens beskaffenhed og fugtighedsgrad. Hvor dybt rørene graves ned afhænger af hvilken jordbehandlig, der anvendes. Jo dybere rørene ligger, jo trægere bliver anlægget og jo længere tid tager opvarmningen til den ønskede jordtemperatur.

Bundvarme, rør på jorden

For varmekrævende bundkulturer er det nødvendigt, selv om der er jordvarme, at lægge rør ud på jorden. Disse rør er oftest jernrør, og skal holdes 5 til 10 cm over jorden, så de altid kan holdes tørre, men også for at opnå maksimal varmeafgivelse.

Ophænges fordelingsrørene i væksthuskonstruktionen, og forbindes bundrørene herfra med syntetiske gummislanger, kan rørene hæves i takt med kulturen, eller ved jordbehandling ophænges i konstruktionen uden vandaftapning, se figur 2.5.

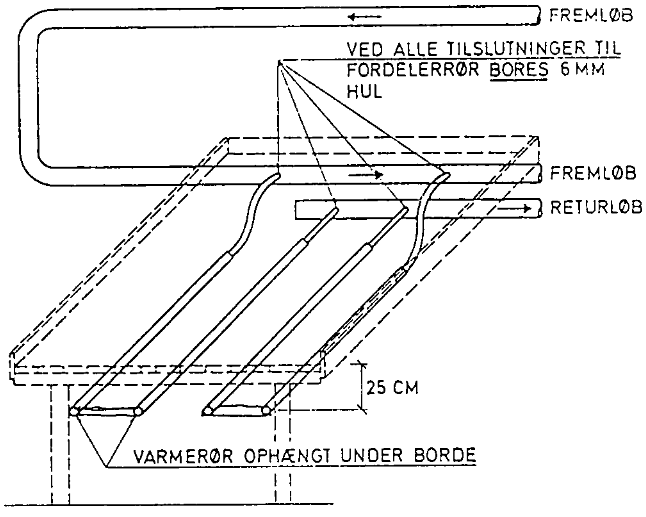


Figur 2.5: Bundvarmerør tilsluttes fordelerrør ved hjælp af dampslange (syntetisk gummislange).

Undervarme, rør under borde

Ved faste borde ophænges normalt fire længder varmerør under et bord (to fremløb og to returløb). Ved rulleborde ophænges to længder (et fremløb og et retur) eller tre længder (et fremløb og to retur). Afstanden fra bordplade til varmerør skal være 25-30 cm for at opnå en ensartet temperatur på bordpladen. Der kan opnås en pottetemperatur på 2-3 °C over rumtemperaturen, hvis bordene forsynes med 'skørter'. For at få en ensartet varmefordeling under samtlige borde, skal der være ens vandstrøm gennem samtlige varmerør. Dette opnås nemmest ved at anvende princippet 'vendt fremløb' eller 'vendt retur', se figur 2.6.

Desuden skal samtlige tilslutninger til hovedledning bores ud med samme diameter (6 ell. 8 mm). Brændes hullerne ud med en svejseflamme, kan det ikke undgås at give forskellig hulstørrelse, med deraf følgende skæv varmefordeling.



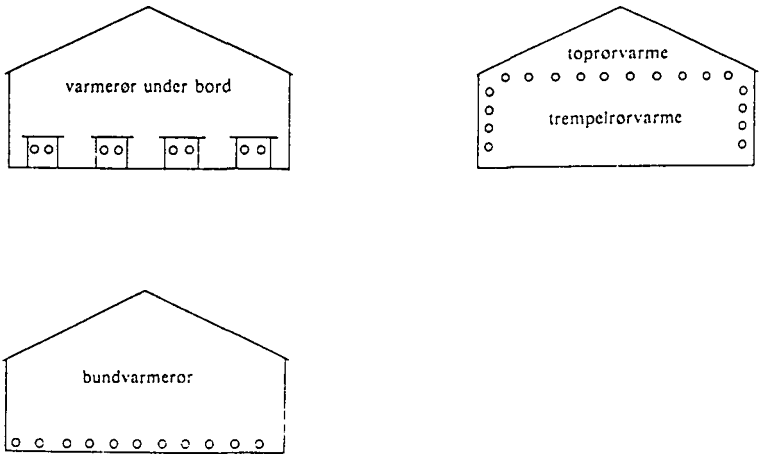
Figur 2.6: Undervarmerørene ophængt under bordene, i dette tilfælde under faste borde.

Bordvarme, rør i borde

For at holde pottetemperaturen ca. 5 °C over rumtemperaturen kan der f.eks. udlægges 12 længder PEL-rør ca 0.5-1 cm under bordpladen. Fremløbstemperaturen kan med dette system tillades op til 60 °C, men afkølingen må ikke overstige 5-10 °C. En slangelængde vil normalt være 55-85 meter, og modstanden vil i denne længde være så stor, at modstanden i fordelerledningen ingen indflydelse vil få for varmefordelingen. Det er derfor ikke nødvendigt at udføre fordelerledningen efter 'vendt fremløb' eller 'vendt returløb' metoden, når forsyningsledningens længde max. er ca. 50 m.

Topvarme

Topvarme udføres af jernrør. Afstanden mellem rørene må ikke være over 2 meter. Topvarmens primære opgave er at hindre en underafkøling af kulturen ved udstråling. Toprørene vil opvarme glasfladen ved stråling og herved formindske udstrålingen fra kulturen. Samtidig vil den del af toprørene, der vender mod kulturen opvarme denne. Figur 2.7 viser skematisk placeringen af de omtalte varmesystemer.



Figur 2.7: Skematisk placering af forskellige varmeanlæg.

2.2.6 Skygge- og isoleringsgardiner

Ofte forsynes væksthuset med et eller flere gardinanlæg. Et gardinanlæg har til formål at skygge for sollyset ved for kraftig indstråling og at varmeisolere om natten. Gardinerne monteres indvendigt i væksthuset, som regel ved, at gardinerne ophænges lodret langs trempler og gavle, mellem glasset og varmerørene, og følger tagkonstruktionen på skrå fra spærfoden og op til rygningen eller vandret fra trempel til trempel oven over topvarmerørene.

Gardinerne fremstilles af kunststoffer som polyethylen, nylon og polypropylen samt aluminiumsstrimler. Gardindugen er vævet mere eller mindre tæt med eller uden aluminiumsstrimler.

For at nedsætte luftskiftet skal gardinet være tæt og virke som et telt i væksthuset. Gardinet skal derfor monteres i størst mulige sammenhængende flader. Klimareguleringen sker kun i det afgrænsede luftvolumen under gardinet, medens luftmassen mellem gardin og glas kan være koldere eller varmere.

For at sikre mod for høj luftfugtighed under gardinet, monteres en hygrostat, der styrer gardintrækket således, at der ventileres til luftrummet over gardinet i stedet for til yderluften, hvorved der spares energi, og unødig træk undgås. Ved normal ventilation til yderluften fjernes vanddampene med luftmassen, men ved intern ventilation til luftrummet over gardinet sker en kondensation på glassets indvendige side, hvor fordampningsvarmen frigives.

Kapitel 3

Varmeanlæg og regulering

Dette afsnit beskriver den traditionelle analoge regulering, der idag stadig er den anvendte teknik i væksthuses varme regulering.

3.1 Automatisering

Automatisering er en proces, der begynder ved valg af varmeanlæg, projektering og dimensionering af installationerne i et væksthus. En korrekt automatisering opnås kun, når automatik og anlæg passer sammen, og når der ved udformningen af anlægget er opnået en "automatikvenlig" konstruktion.

Automatisering kan for et givet anlæg udføres mere eller mindre vidtrækkende. Man taler ofte om en "automatiseringsgrad", der er vanskelig at definere, men som er et udtryk for det omfang, hvori anlægget er i stand til at opfylde de ønskede funktioner uden stadig manuel indgriben.

Til automatiseringen hører også instrumenter til kontrol af anlæggets funktioner, herunder melding om indtrådte fejl og/eller begyndende svagheder i systemet, den såkaldte tilstandskontrol.

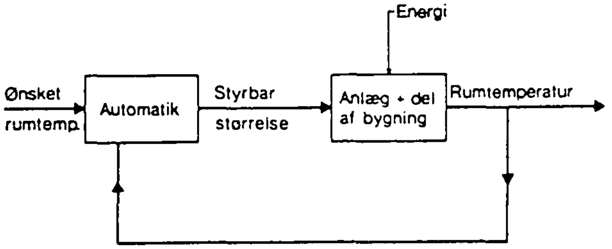
Automatiseringens formål

Formålet med automatisering er

- at anlæggets funktion, f. eks. opvarmning af et væksthus, automatisk opfylder de opstillede krav til temperaturforløb over døgnet, og tilpasser sig ændrede betingelser, f.eks. ændring af udetemperaturer eller af den interne "gratisvarme" fra f. eks. belysningsarmaturer.

- at anlæggets funktion opfyldes mest energiøkonomisk. Til dette punkt hører f.eks. overvejelser om sænkninger af temperaturer i kulturperioden samt andre former for tidsstyringer.

- at anlægget fungerer driftsikkert, dvs. at de opståede fejl er relativt få og kortvarige, og ikke kan forårsage omfattende skader, f. eks. kulturskader. Dette



Figur 3.1: Blokdiagram af automatiksystemet for en rumtemperaturregulering.

tilgodeses dels ved valget af automatik og eventuelle "dobbeltsikringer", dels ved en hensigtsmæssig instrumentering, der giver mulighed for fejlfinding og nem inspektion af anlæggets tilstand.

- at opfylde sikkerhedsmæssige, ofte lovpligtige krav, f.eks. styring og begrænsning af kedeltemperaturer.

Automatisering begrænser energiforbruget. En korrekt udført automatisering begrænser unødvendigt energiforbrug, da man herved opnår:

- at gratisvarme udnyttes

- at "plantekomfort-temperatur" kun opretholdes der, hvor det er nødvendigt, og når det er nødvendigt

- at fejltilstande bliver sjældnere og mere kortvarige.

  Størrelsen af energibesparelserne kan ikke angives generelt, da den afhænger af mange forhold.

3.2 Reguleringssystemer

En god generel reference til dette afsnit er [Heilmann og Hansen, 1985], for de mere væksthus-relaterede spørgsmål henvises i almindelighed til [Nielsen et al., 1980] og [Udink ten Cate, 1983].

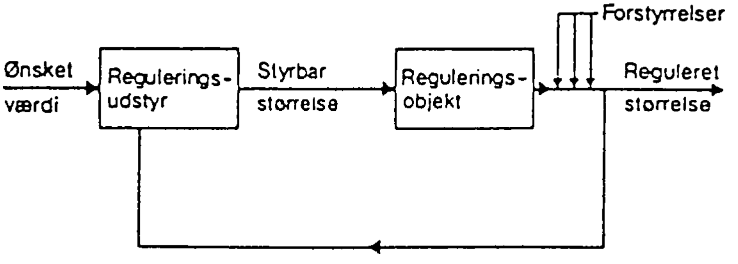
Et reguleringssystem består af automatikken og den del af varmeanlægget og væksthuset, der indgår i systemet, og sørger for en rumtemperaturregulering, se blokdiagrammet figur 3.1.

Det er automatikkens opgave at måle den temperatur ("temperaturføler"), der skal reguleres, og sammenligne den med en ønsket værdi. Hvis der ikke er overensstemmelse, skal automatikken påvirke energitilførslen (f.eks. en fremløbstemperatur via et blandearrangement eller en vandstrøm via en tovejs motorventil) således, at rumtemperaturen går i den rigtige retning, og efterhånden finder ind til en acceptabel værdi (toleranceinterval).

Et reguleringssystem eksisterer ikke isoleret fra omverdenen - det har forbindelse til den gennem sin effekttilførsel og gennem forskellige andre "omverdensstørrelser", der har indflydelse på systemets balance og på den regulerede temperaturs værdi.

Ved en rumtemperaturregulering har varmemediets temperatur, antallet af varmekilder i huset (belysningsarmaturer), udetemperaturen og luftvinduernes åbningsgrad betydning for reguleringssystemets indstilling.

Alle ændringer i de nævnte "omverdensstørrelser" virker på reguleringssystemet som "forstyrrelser", der tvinger det til at ændre sin tilstand, se figur 3.2.

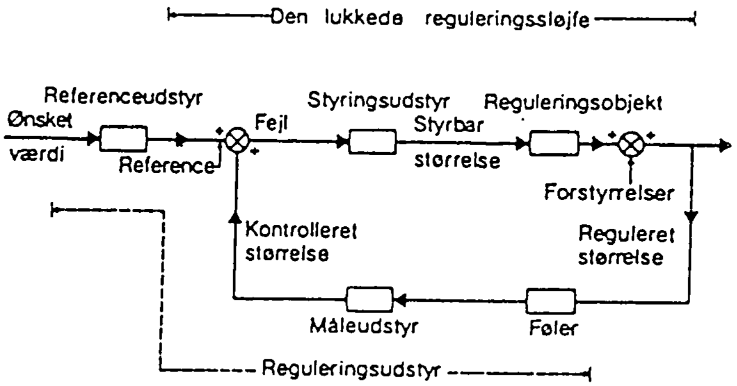


Figur 3.2: Ændringer i omverdenen virker på regulerings-systemet som forstyrrelser, der tvinger det til at ændre tilstand.

Systemets "evne" til at modvirke "forstyrrelsernes" indflydelse på den regulerede temperatur (eller en anden fysisk størrelse) kan være større eller mindre alt efter systemets sammensætning. Ikke blot forstyrrelsernes styrke, men også deres tidsforløb (om de varierer hurtigt eller langsomt) har betydning for deres indflydelse på reguleringssystemet.

Det karakteristiske for et reguleringssystem er den "lukkede sløjfe", der opstår ved følerens tilbagemelding om f.eks. en temperatur, sammenligningen med den ønskede værdi, automatikken og energistrømmen til anlæg+bygning, resulterende i en vis rumtemperatur, som måles, sammenlignes o.s.v. - altså en stadig cirkulation af målinger, energistrømme og temperaturer.

Det generelle blokdiagram for et reguleringssystem er vist på figur 3.3.



Figur 3.3: Generelt blokdiagram for et reguleringssystem.

3.2.1 Pendlinger

Som nævnt består et automatiksystem af en lukket sløjfe, hvori data- og energistrømme cirkulerer.

Jo kraftigere ændring i energistrømmen, der forårsages af en ændring af fejlen - dvs. forskellen mellem ønsket temperatur og virkelig temperatur - jo kraftigere er reguleringssløjfens "forstærkning". En stor "forstærkning" i systemet kan i nogle tilfælde give et nøjagtigt system (selv en lille fejl vil udløse en kraftig energiændring), der hurtigt vil føre temperaturen tilbage igen på plads.

Hvis reguleringssystemets forstærkning er for stor, begynder systemet at "pendle", d.v.s. den regulerede størrelse, f.eks. rumtemperaturen, svinger op og ned. Man er kommet i den situation, at automatikkens egenskaber (forstærkning og energiakkumulerende forhold, f.eks. følerens termiske træghed) ikke passer sammen med varmeanlæggets og eventuelt bygningens (væksthusets) egenskaber.

I den stokastiske regulerings teori (se nærmere [Åström, 1970]) forklarer man sådanne pendlingers opståen ved hjælp af fænomenet "støj".

Jo større forstærkning reguleringssløjfen har, jo nøjagtigere virker reguleringen i princippet- men kun indtil det punkt, hvor systemet begynder at pendle. Det er derfor vigtigt, at reguleringssystemet dimensioneres og indstilles til størst mulig forstærkning, men dog ikke mere end at systemet er i passende afstand fra pendlingssituationen.

Faren for pendlinger er størst i systemer med tidsforsinkelse. Tidsforsinkelsen er den tid, det tager fra det øjeblik energistrømmen ændres (f.eks. ved ændring af ventilstilling) og til det øjeblik, hvor måleudstyret begynder at registrere denne ændring. Tidsforsinkelser kan undgås, f.eks. ved en rimelig hurtig cirkulation, så ændringer i fremløbstemperaturen hurtigt forplanter sig fra varmecentralen og ud i varmerørerne og videre til rummet (væksthuset).

De reguleringsformer, der almindeligvis anvendes i varmeanlæg, er ikke særligt tilbøjelige til pendlinger, hvis blot ovennævnte forhold tages i betragtning.

3.2.2 Regulatorer

De regulatorer, der oftest bruges i varmeanlæg, er:

1. 2-stillings regulering eller ON-OFF regulering
2. Flydende regulering
3. Proportional regulering
4. Proportional-integral regulering

I praksis findes en del sammenblandinger af disse reguleringsformer.

Reguleringsformerne 2-4 kan kombineres med seriestyring, d.v.s. en opdeling af motorventilen på flere enheder, der er koblet i serie således, at ventil nr.2 først påbegynder sin vandring, når ventil nr.1 har vandret 100 pct. Således fortsættes med nr.3, 4 osv. Ved påvirkning i modsat retning påvirkes den sidste ventil først, derefter den næstsidste osv.

2-stillings regulering eller ON-OFF regulering

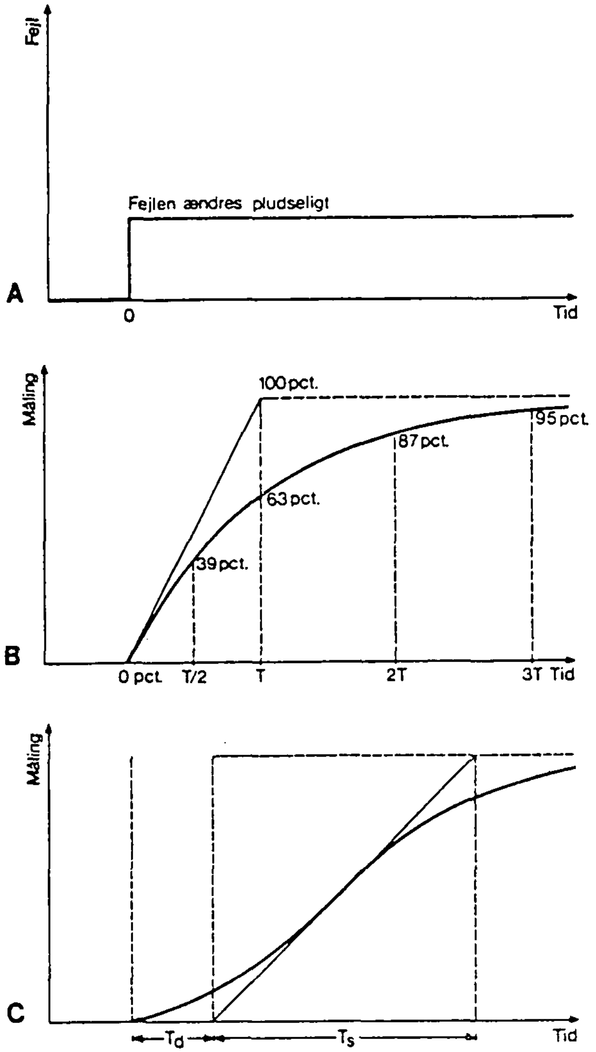
Denne regulering har kun to stillinger for energistrømmen, f.eks. som en oliefyrstermostat, der slår fyret til ved en indstillet minimumsværdi, f.eks. 85°C og fra igen ved en højere temperatur, f.eks. 92°C. Den ene stilling fås, når fejlen er over en vis, positiv værdi, den anden når fejlen er under en vis negativ værdi. Intervallet mellem disse værdier kaldes for egendifferencen. Egendifferencen er i det ovenstående eksempel med oliefyrs-termostaten 7°C.

Hvornår en 2-stillingsregulering egner sig, afhænger af reguleringssystemets dynamiske forhold.

De dynamiske forhold kan iagttages ved at registrere, hvorledes den regulerede størrelse, f.eks. kedeltemperaturen eller en rumtemperatur, ændrer sig, når energistrømmen pludseligt ændres, eksempelvis et oliefyr, der går igang (se figur 3.4 A og B , side 30) eller en ventil, der pludseligt åbnes (figur 3.4 A og C).

Temperaturstigningen på figur 3.4 B siges at følge et tidskonstantforløb. Et forløb med en tidskonstant får man, når anlægget domineres af en enkelt stor energiakkumulator, f.eks. opvarmning af en oliefyrs-kedel eller en varmtvandsbeholder. Af figur 3.4 B ses, at temperaturen efter et tidsforløb svarende til en halv tidskonstant (T/2) er ændret 39% af sin fulde ændring, efter tiden T (svarende til tidskonstanten), 63%, efter tiden 2T, 87%, og efter tiden 3T, 95%. På figur 3.4 B er linjen for stigningens begyndelses-hældning optegnet. Det ses, at den netop skærer linjen for 100% ændring til tiden T, lig med tidskonstanten.

En 2-stillingsregulator egner sig kun, når temperaturstigningen (eller en anden størrelse, f.eks. en trykstigning) har et forløb, der er lig med, eller meget nær tidskonstantforløbet som på figur 3.4 B.



Figur 3.4: Forløbet af den regulerede størrelse, f.eks. en temperatur, ved en pludselig ændring af energitilførslen. A viser den pludselige ændring, B hvordan temperaturen forløber i et system uden dødtid, og C hvordan temperaturen forløber i et system med dødtid. T_d er dødtiden, T_s er stigetiden. Jo mindre forholdet T_d/T_s er, jo mere reguleringsvenligt er systemet. Bemærk, at tidsakserne på figur B og C er forskellige.

Stigningsforløbet på figur 3.4 C er præget af, at anlæg+ eventuelt en del af huset indeholder flere varmeakkumulerende elementer (tidskonstanter) og eventuelt en eller flere tidsforsinkelser (f.eks. lang transporttid mellem blandearrangement og temperaturføler). Situationen i figur 3.4 C er langt den almindeligste i varmeanlæg. Som vist på figuren, kan forløbet inddeles i to tidsintervaller: "dødtiden",T_d, og "stigetiden", T_s. Jo mindre forholdet T_d/T_s er, jo mere reguleringsvenligt er systemet, og jo nøjagtigere og hurtigere kan reguleringen indstilles.

Flydende regulering

Flydende regulering er betegnelse for en regulering, hvor motorventilen (elektrisk, pneumatisk eller hydraulisk) bevæger sig med konstant fart mod sin ene yderstilling, når fejlen (forskellen mellem den ønskede og den virkelige værdi) er over en vis, positiv værdi, og mod sin anden yderstilling, når fejlen er under en vis, negativ værdi. I intervallet mellem disse værdier (den neutrale zone eller "dødzonen") er motorventilen i ro.

Flydende regulering anvendes kun, hvor motorventilens "løbetid", d.v.s. den tid, det tager for ventilen at bevæge sig fra sin ene yderstilling til den anden med konstant fart, er væsentlig større end reguleringssystemets tidskonstant, se figur 3.4 B .

Som tommelfingerregel gælder, at motorventilens løbetid skal være ca. 10 gange så stor som reguleringssystemets tidskonstant (se figur 3.4 B) eller ca. 15 gange så stor som $T_d + T_s$ (se figur 3.4 C).

Da motoren skal arbejde så langsomt som angivet, vil en flydende regulering være meget langsomt regulerende, set i forhold til anlæggets reaktionstid.

Flydende regulering anvendes først og fremmest til regulering af fremløbsvandets temperatur til varmerørene i afhængighed af udetemperaturen.

Reguleringsobjektet i reguleringssystemet udgøres her kun af ventilens vandindhold samt rør- og vandstrækning hen til dykrørsføleren, der måler blandingstemperaturen. Den eneste tidskonstant, der kommer ind i systemet, er følerens tidskonstant, der for en dykrørsføler med kontaktolie i røret sjældent overstiger ca. 30 sek. Motorens "løbetid" skal derfor være mere end ca. 10 gange 30 sek.= 300 sek.

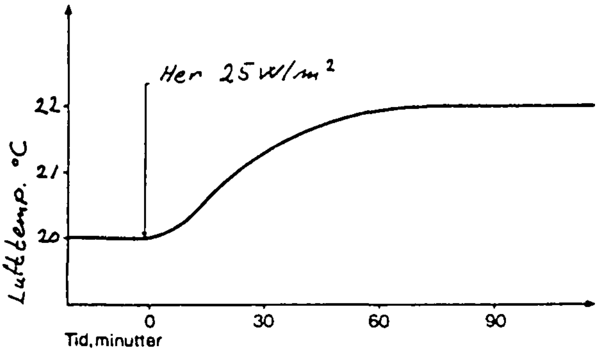
Proportional-regulering

Denne reguleringsform er endnu den mest anvendte inden for automatisering af varmeanlæg.

Navnet på denne reguleringsform kommer af, at påvirkningen på ventilen er proportional med afvigelsen mellem den ønskede og den virkelige temperatur (*fejlen*):

$$\textit{Ventilsignal} = \textit{Konstant gange } (T_{observeret} - T_{sp}) \quad \text{, eller}$$

$$S(t) = K \cdot (T_{obs}(t) - T_{sp}(t)) = K \cdot e(t) \tag{3.1}$$



Figur 3.5: Temperaturforløb i et væksthus *uden* termostatregulering ved pludselig belastningsændring.

hvor altså K er en konstant, og T_{sp} står for *sætpunkt*, der er den tekniske betegnelse for den ønskede værdi af den regulerede variabel, her temperaturen.

$e(t) = (T_{obs} - T_{sp})$

er *fejlen* til tid t.

Man arbejder her med det vigtige begreb: proportional-båndet (P-bånd eller PB), der defineres som den stigning i den regulerede temperatur, der skal til for at få ventil stillingen til at ændre sig fra fuld, dimensioneret vandstrøm til lukket stilling. Jo mindre proportionalbåndet er, jo mindre vil afvigelsen blive. Derimod kan et lille proportionalbånd give systemet større tilbøjelighed til pendlinger.

En proportionalregulator mindsker afvigelsen fra den ønskede værdi, men den fjerner ikke fejlen helt. Nøjagtigheden af regulatoren bestemmes af dimensioneringen af det valgte, eventuelt indstillede proportionalbånd, PB. Den afvigelse, der efter en indtrådt påvirkning (forstyrrelse) bliver tilbage, kaldes belastningsafvigelsen eller oftere, off-set.

At tale om en proportional-regulators nøjagtighed er meningsløst, hvis påvirkningens størrelse og dimensioneringen af systemet ikke kendes.

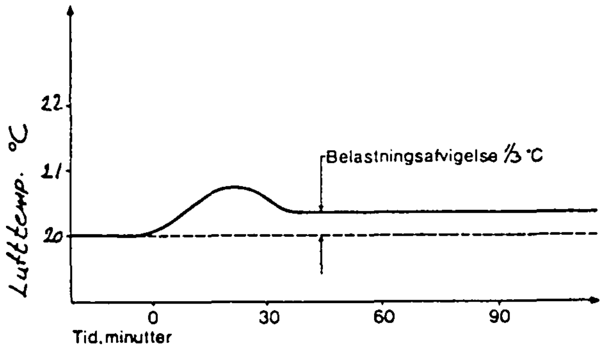
På figur 3.5 er vist, hvordan lufttemperaturen i et væksthus kan tænkes at variere efter en indtrådt påvirkning (f.eks. ved tilførsel af 25 watt pr. m^2 fra belysning). Figuren viser, hvad der sker med lufttemperaturen uden termostat, figur 3.6 derimod reaktionen når huset er forsynet med en proportionalt regulerende termostatventil.

I figur 3.5 stiger temperaturen ca. 2 °C i løbet af en time.

Ifølge figur 3.6 vil termostatens føler efter 5-15 minutter begynde at påvirke ventilen mod lukning. Efter ca. 30-50 minutter vil temperaturen atter have fundet en stabil tilstand, der dog afviger fra den ønskede med en vis værdi, belastningsafvigelsen, som i dette tilfælde er beregnet til 1/3 °C, altså en afvigelse, der er 6 gange mindre end tilfældet *uden termostat.*

Ved tilført gratisvarme kan temperaturen dog aldrig i længere tid overstige 21 °C, uden at ventilen lukkes helt (forudsat PB= 1 °C), dvs. der tilføres i så fald ingen varme fra varmeanlægget.

Proportionalregulatorer anvendes hovedsageligt i varmeanlæg ved følgende regu-



Figur 3.6: Temperaturforløb i et væksthus *med* proportionalt virkende regulator ved en pludselig belastningsændring.

leringsobjekter:

- radiatorer, konvektorer (radiatortermostater)
- varmtvandsbeholdere
- varmevekslere (op til ca. 80 °C)
- fjernvarme, returtemperaturer
- tryk (vand, damp)
- varmt brugsvand, blanding.

I næsten alle andre tilfælde, bortset fra de under 2-stillings og flydende regulering nævnte, anvendes den fjerde reguleringsform: *Proportional-integral regulering.*

Proportional-integral regulering (PI-regulering)

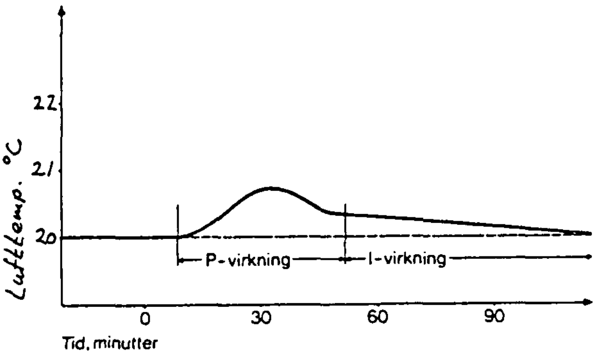
Denne regulering har bevaret proportionalreguleringens gode egenskaber: En ret hurtig regulering med relativt lille tendens til pendlinger kombineret med en egenskab, der minder om den flydende regulering, nemlig en langsom tilbagevenden til den ønskede værdi efter en bestemt opstået påvirkning.

Dette opnås ved, at ventilen i starten påvirkes som angivet under proportionalregulering, men dernæst foretager en langsom vandring, indtil den ønskede værdi atter er opnået.

Mere præcist er PI-regulatoren defineret ved følgende ligning, der skal sammenlignes med ligning (3.1):

$$S(t) = K_1 \cdot e(t) + K_2 \cdot \int_{-\infty}^{t} e(x)dx \tag{3.2}$$

hvor altså K_2 er en ny konstant.



Figur 3.7: Temperaturforløb i et væksthus med proportional-integral regulator ved en pludselig belastningsændring.

På figur 3.7 vises, hvordan temperaturforløbet fra eksemplet i figur 3.5 vil blive ved PI-regulering. Ved PI-regulering bliver der ingen belastningsafvigelse, men det tager relativt lang tid, før den ønskede temperatur er nået igen.

PI-regulatorens I-virkning kan indstilles til forskellige værdier. Den indstillede værdi kaldes efterstillingstiden eller integraltiden, og måles i sekunder eller minutter. Jo længere efterstillingstid, jo længere er reguleringssystemet om at finde på plads efter en forstyrrelse.

Som en tommelfingerregel regnes med:

1. Efterstillingstiden $= 3.5 \cdot T_d$
2. Proportionalbåndet $= 1.25 \cdot T_d/T_s \cdot$(forskellen i f.eks. lufttemperaturen ved maximal opvarmning hhv. ingen opvarmning).

Typiske efterstillingstider:

- Regulering af varmeveksler: 0.5 - 1.5 min.
- Regulering af rumtemperatur: 5 - 15 min.

Lange efterstillingstider giver langsom reguleringseffekt, og for korte efterstillingstider kan give pendlinger i systemet.

PID regulering

Indføres foruden PI-virkningen en differentierende virkning, dvs. ventilens bevægelse er afhængig af ændringshastigheden af f.eks. rumtemperaturen (jo større ændringshastighed, jo større ventilbevægelse), kaldes regulatoren en PID-regulator. Den er altså defineret ved følgende udtryk, der skal sammenlignes med udtrykkene (3.1) og (3.2) :

$$S(t) = K_1 \cdot e(t) + K_2 \cdot \int_{-\infty}^{t} e(x)dx + K_3 \cdot \frac{d\,e(t)}{dt} \tag{3.3}$$

Dette medfører, at forstyrrelser med hurtige variationer dæmpes mere i reguleringssystemet end opnåeligt med en enkel P- eller PI-regulator. For at opnå fordele ved D-virkningen må anlæggets "effektkilde" være rigeligt dimensioneret.

En PID-regulator kræver en omhyggelig vægtning af de tre konstanter K_1, K_2, K_3, men vil så til gengæld give en meget fin regulering.

Ventiler for regulering.

Alle reguleringsventiler skal dimensioneres. For store ventiler giver tilbøjelighed til dårlig regulering og pendlinger. Reguleringskvaliteten vil for en overdimensioneret ventil ændre sig med arbejdspunktet, dvs. med belastningen og årstiden.

Til dimensioneringen kræves kendskab til den dimensionerende vandmængde (m^3/time) og det dertil ønskede differenstryk over ventilen.

Heraf findes ventilens k_v-værdi, som er et mål for ventilstørrelsen, nemlig vandstrømmen i m^3/time ved et differenstryk på 1 bar ($\approx$ 10 meter vandsøjle, kort: 10 m VS) over ventilen. Man har:

$$k_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{vandmængde \;\; i \;\; \mathrm{m}^3/\mathrm{time}}{\sqrt{0.1 \cdot differenstryk \;\; i \;\; \mathrm{m\ VS}}}$$

Differenstrykket over ventilen skal vælges rigtigt, afhængigt af det brugte ventilarrangement.

I varmeanlæg bruges hovedsageligt kun 6 ventilkoblinger, hvoraf de 4 indeholder 3-vejs ventiler, se figur 3.8. Ventilerne kan være 2-vejs eller 3-vejs ventiler, og de kan monteres i de viste seks ventilkoblinger som vist på figuren. 3-vejs ventiler kan være monteret som blande- eller fordelerventiler, men er her monteret som blande-ventiler.

Følere

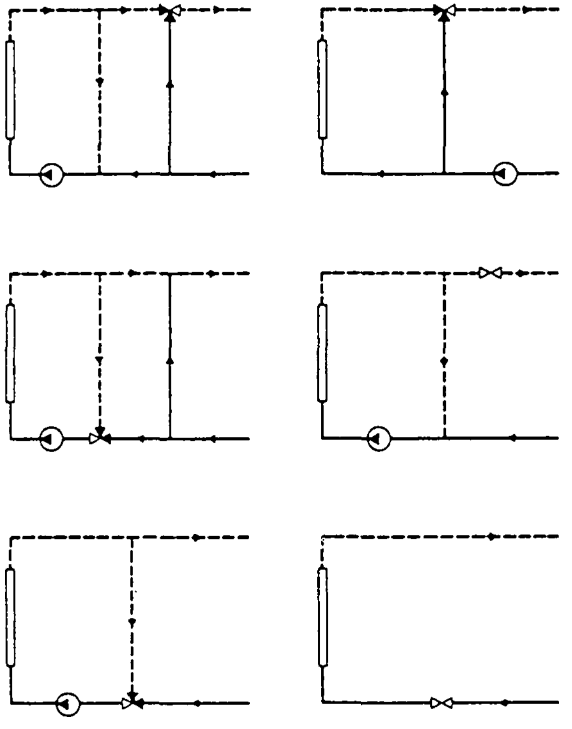
Intet reguleringssystem virker bedre end føleren, dvs. hvis føleren måler forkert vil systemet også regulere forkert.

Det er ikke tilstrækkeligt, at føleren er "nøjagtig" ifølge fabrikanten - den skal også anbringes, så den virkeligt føler den temperatur, eventuelt tryk eller anden størrelse, der skal måles.

Det er derfor overordentligt vigtigt, af føler-placeringer projekteres og udføres omhyggeligt. Følerne bør også måle ændringer så hurtigt som muligt, f.eks. bør dykrørsfølere altid forsynes med kontaktolie i dykrøret.

Regulering af fremløbstemperatur

Det varme vand fra kedel, varmeveksler eller fjernvarmeværk blandes med det koldere returvand fra varmerørene. Blandingen sker, så fremløbstemperaturen passer til varmebehovet ved den aktuelle udetemperatur. I anlæg med fjernvarmeveksler kan reguleringen ske med en ventil på vekslerens fjernvarmeside.



Figur 3.8: Seks ventilkoblinger til brug i varmeanlæg.

Komponentvalg

Blanding af returvand og fremløbsvand kan ske i en af de ventilkoblinger, som er vist på figur 3.8. Valg af ventilkobling afhænger af anlægsmodel m.m. .

Man vælger normalt en 3-vejs ventil, som er logaritmisk og usymmetrisk, for at opnå linearitet i det samlede reguleringssystem. Denne linearitet kan også opnås med lineære, symmetriske ventiler, hvis regulatoren har "indbygget" en tilsvarende logaritmisk funktion. Det er således ikke nødvendigt, at den logaritmiske funktion ligger i selve ventilen.

Ventilmotoren vælges sådan, at den resulterende løbetid for ventilen bliver rigtig. Som tommelfingerregel for de hyppigt anvendte "flydende" reguleringer skal løbetiden være ca. 10 gange så stor som reguleringssystemets tidskonstant; for fremløbsregulering med en fremløbsføler i et dykrør vil den typiske løbetid være 300 sekunder, og noget længere for en påspændingsføler.

Desuden skal motorkraften være så stor, at den kan holde ventilen lukket mod det maksimale differenstryk over ventilen.

Ofte benyttes ventiler og motorer med mulighed for manuel betjening i tilfælde af strømsvigt eller fejl ved regulator eller motor.

Ventil eller motor er ofte forsynet med en viser, eller lignende, som markerer ventilens stilling. Dette er en stor hjælp ved kontrol af ventilens funktion netop ved de langsomtgående ventiler.

3.2.3 Ventilation

I det øjeblik belastningen forsvinder (f.eks. når udetemperaturen overgår indetemperaturen, eller ved kraftigt strålingsindfald), ophører varmeanlæggets temperaturregulering, og ventilation bliver måske aktuel. Normalt reguleringsudstyr vil have en kontrolfunktion for ventilation, hvor man kan vælge størrelsen af "dødzonen", d.v.s. intervallet mellem den temperatur, hvor ventilerne er helt lukkede, og den temperatur , hvor man ønsker, at ventilationen skal sætte ind med åbning af vinduer. Dette interval angives ved et vist antal grader (gerne et par stykker). Vinduerne vil så lukke igen, når temperaturen er dalet et stykke ned i "dødzonen".På denne måde undgår man, at vinduerne står og springer op og i.

Der er altså tale om en simpel ON-OFF regulering med nogle muligheder for raffinementer (se næste afsnit 3.3). I dette tilfælde er selve regulator-mekanismen, in casu luftningsvinduer, temmelig grov i sin virkemåde, idet luftudskiftningen er særdeles vanskelig at styre. Det har da også vist sig særdeles vanskeligt at inkludere ventilationen i de modeller, der indtil nu har været lavet for væksthuses varmedynamik. Denne problemstilling er nærmere omtalt i [Udink ten Cate, 1983].

3.3 Klimastyring i væksthuse

Styring af indeklimaet i et væksthus sker efter en passende strategi for valg af sætpunkt for f.eks. indetemperaturen.

Man foreskriver f.eks. en grundtemperatur i natperioden og et vist "dagtillæg" (d.v.s. et lidt højere eller lavere sætpunkt om dagen), en indstrålingsafhængig temperatur (et lys-tillæg) og en ventilationsgrænse (ventilationstillæg) ved hvilken temperatur man begynder at lufte ved hjælp af de gennemgående luftvinduer. Ventilationen kan styres i flere detaljer, således at luftvinduerne først åbnes i læ-siden af huset og sidenhen i luv-siden.

Den relative luftfugtighed kan styres separat, men kan også bringes til at overstyre temperaturreguleringen og gardinfunktionen. Overstiger luftfugtigheden en vis grænse, kan luftfugtigheden sænkes ved, enten at hæve lufttemperaturen ved at give mere varme eller ved at åbne luftvinduerne og, hvis gardinerne er trukket for, ved at trække gardinerne delvist fra. For høj luftfugtighed indtræffer ofte kort tid efter vanding af kulturerne eller lige efter solnedgang.

Lige efter solnedgang vil der ved skyfri himmel (og fratrukne gardiner) ske en kraftig udstråling af varme fra bladoverfladerne til himmelrummet med en bladtemperatursænkning til følge. Denne bladtemperatursænkning vil, ved en passende luftfugtighed, forårsage uønsket dugdannelse på bladene. Dugdannelsen vil i mange tilfælde initiere spiring af de svampesporer, der altid ligger på bladene, hvilket kan blive starten på et sygdomsangreb på kulturen.

Et andet vigtigt område er CO_2-docering, der kan gives efter mangfoldige principper. Koncentrationen af CO_2 vides at have en stor indflydelse på planternes vækst, særlig når den kombineres med stærk indstråling.

Her er et af de mest utilfredsstillende aspekter ved den relativt primitive ventilations teknik, der anvendes i væksthuse, at CO_2 koncentrationen falder drastisk, når der ventileres, hvilket jo som oftest netop sker når indstrålingen er høj. Desuden vides planter bedre at kunne tåle høje temperaturer, når der er en høj CO_2 koncentration.

Dette leder os over til næste afsnit.

3.3.1 Klimacomputere

Der findes i øjeblikket omkring 150 "klimacomputere" i kommerciel brug i Danmark, hvilket er langt færre end i f.eks. Holland.

Med en sådan udvidelse af kontrol- og reguleringsudstyret åbner der sig i princippet uendeligt mange muligheder for at styre klimaet i væksthuset (temperatur, fugtighed, lysintensitet, CO_2 indhold, blad temperatur, rodzone temperatur og, hvem ved, måske musik docering for særligt følsomme planter).

Et generelt problem med disse mange muligheder er imidlertid, at man får brug for at prioritere forskellige indgreb i klimaet efter forskellige principper (hvilket ofte kaldes "hierakisk styring ", [Udink ten Cate, 1983]). Dette vil ofte kræve en stor indsigt af den, der skal implementere klima-strategien på computeren.

En oversigt over denne teknologi's stade i Danmark findes i en nylig fremkommen rapport, se [Ehler og Rystedt, 1988].

Det er nok fair at sige, at der vil gå nogen tid før de potentielle muligheder for avanceret klima-styring for alvor bliver udbredte i praksis, selvom der, f.eks. i Holland, arbejdes på disse problemer.

3.3.2 Energi forbrug og digitalteknik

En anden anvendelse af digitalteknik i væksthuse ligger i muligheden for bedre styring af energi-forbruget, der som omtalt i indledningen udgør en meget væsentlig post på udgiftssiden i en gartneri-økonomi.

Indførelsen af digitalteknik og klimacomputere vil næppe kunne ændre væsentligt på kvaliteten af selve temperatur reguleringen (fastholdelse af væksthusets klima ud fra valg af diverse sætpunkter), men det vil formodentlig være muligt at lave bedre strategier for styring af sætpunktet som funktion af registrerede (og måske prognostiserede) klimadata.

"Bedre" kan i denne forbindelse både betyde, at energiforbruget nedsættes og at "plantekomforten" forbedres.

Det er netop dette aspekt af digital-teknologiens muligheder, der er hovedemne for dette projekt og de følgende sider i denne rapport.

Kapitel 4

Generelle modeller for dynamiske systemer

Det følgende kapitel beskriver den teori, der ligger bag dette forprojekt.

Det første afsnit opstiller forskellige fysiske modeller for væksthusets varmedynamik, med udgangspunkt i hyppigt anvendte modeller for andre bygninger (som beskrevet i litteraturen). Det drejer sig her om at få fat i håndtérbare approksimationer til de særdeles komplicerede ligninger, der i virkeligheden styrer varmedynamikken. Disse tilnærmede modeller indeholder forskellige fysiske konstanter, og det er i forsøget på at estimere disse, at de stokastiske metoder, der omtales i de næste to afsnit, kommer ind i billedet.

Der er tale om to forskellige fremgangsmåder, dels en beskrivelse af det fysiske systems opførsel udfra en slags "black-box" tankegang vha. de såkaldte *ARIMA*-modeller, dels en mere direkte metode, der tillader en estimation af de fysiske parametre. De to metoder bør dog i teorien give samme skøn for de såkaldte tidskonstanter, som beskriver trægheden i det fysiske system, hvilket giver mulighed for sammenligninger.

4.1 Tilstandsmodeller ud fra fysikken

De mulige mekanismer for varmeoverførsel er varmeledning, konvektion og stråling. Ledning er ansvarlig for varmeoverførsel i faste legemer, medens konvektion hidrører fra strømning af væske eller luft. Denne strømning kan enten være en fri strømning (termisk drevet) eller tvungen strømning (f.eks. ved ventilation). Varmeoverførsel ved stråling optræder mellem legemer med forskellig temperatur, som er i optisk kontakt med hinanden.

Nærværende afsnit indeholder en kort beskrivelse af, hvorledes ovennævnte basale fysiske mekanismer for varmeoverførsel, sammen med diverse approksimationer, traditionelt anvendes til en formulering af dynamiske modeller for bygningers varmedynamik. Baseret på lignende approximationer formuleres derpå nogle modeller, som kunne give en passende beskrivelse af væksthuses varmedynamik. Næsten alle de modeller for bygningers varmedynamik, som findes i litteraturen, er baseret på ordinære differentialligninger som en approximation til det fysiske distribuerede system. Næste afsnit indledes med en illustration af forskellen mellem distribuerede systemer og 'lumped' systemer, dvs. mellem systemer beskrevet ved partielle differentiallingning og systemer, beskrevet ved ordinære differentialligninger.

4.1.1 Ordinære differentialligninger som en approximation af et distribueret system.

Lad os eksempelvis betragte en homogen væg - se figur 4.1. I en væg er varmeledningen den afgørende mekanisme for varmeoverførsel. Såfremt væggen er homogen, bliver varmefluxen 'langt' væk fra hjørner en-dimensional, hvorfor temperaturgradienten, $\partial T/\partial t$, beskrives af den en-dimensionale diffusionsligning

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{4.1}$$

hvor λ er varmeledningsevnen, c varmekapaciteten og ρ massetætheden. I andre tilfælde, som f.eks. nær et hjørne, er strømningen mere kompliceret, og den beskrives alment af diffusionsligningen

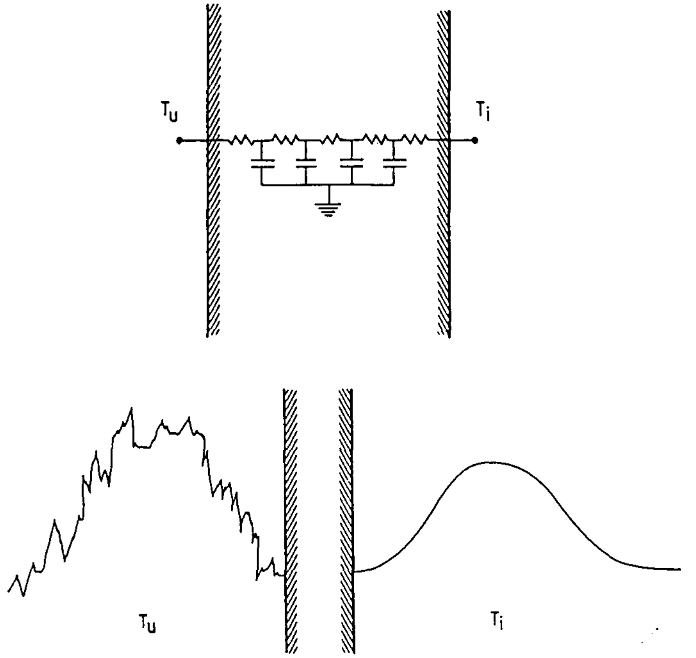
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{4.2}$$

Dvs. vægge, gulve, osv. er med hensyn til varmedynamikken et distribueret system, og beskrives som sådan af partielle differentialligninger (som 4.2).

I mange tekniske sammenhænge er det dog almindeligt at approximere det distribuerede system med et lumped system, dvs. et system af ordinære differentialligninger. Betragtes eksempelvis en homogen væg, da kan dynamikken approximativt beskrives ved et lumped system bestående af seriekoblede varmekapaciteter og modstande - som illustreret i figur 4.1. Denne fremstilling giver en mere bekvem modelramme, idet et sådant system beskrives matematisk af ordinære differentialligninger. Men det er også klart, at lokale spatielle variationer ignoreres, når ordinære differentialligninger anvendes til at beskrive et distribueret system.

Under stationære forhold ($\partial T/\partial t = 0$) kan ligningerne naturligvis simplificeres. Eksempelvis udtrykker (4.1), at gradienten af temperaturen, $\partial T/\partial x$, er konstant under stationære forhold.

I det følgende redegøres for hvordan bygningers varmedynamik traditionelt beskrives ved ordinære differentialligninger. For almindelige bygninger må det antages, at de ordinære differentialligninger giver en rimelig beskrivelse. På længere sigt vil det dog være interessant at betragte distribuerede systemer i et forsøg på at tilvejebringe endnu mere fysisk realistiske modeller. Det må forventes, at det specielt er ved bygninger med meget tykke vægge (f.eks. kirker), og bygninger, som ikke er isoleret mod jorden, at det kan være påkrævet med beskrivelser i form af partielle differentialligninger. For væksthuse må det forventes, at en væsentlig del af det varmeakkumulerende medium udgøres af jorden.



Figur 4.1: Et distribueret system (f.eks. en homogen væg) kan approximeres af et 'lumped' system (Herved kan der angives et ækvivalent elektrisk system i form af koblede kapaciteter og modstande).

4.1.2 Almindelige antagelser i modeller af bygningers varmedynamik.

Traditionelt opbygges modeller for bygningers varmedynamik deduktivt, dvs. på grundlag af kendskab til - eller antagelser omkring - fysiske love og konstanter hørende til et subsystem. Den totale model for bygningen fremkommer derpå ved blot at sammenkoble ligningerne for subsystemerne. For at illustrere den deduktive metode for modelbygning må vi derfor først omtale de fundamentale eller hyppigst anvendte beskrivelser for varmeoverførsel ved ledning, konvektion og stråling.

Den fundamentale lov for varmeledning udtrykker, at varmefluxen pr. arealenhed, ϕ^*, er proportional med temperaturgradienten i mediet, dT/dx , dvs.

$$\phi^* = -\lambda \frac{dT}{dx} \tag{4.3}$$

hvor λ er varmeledningsevnen, som igen afhænger af en række materielle og fysiske forhold [Zemansky, 1968]. Når man betragter varmeoverføring i bygninger er variationen af de fysiske faktorer i almindelighed begrænset, hvorfor man i bygningsmæssige sammenhænge oftest kun betragter varmeledningsevnen som værende afhængig af materialet.

Da gradienten af temperaturen er konstant ved stationære forhold, følger det af (4.3) at varmefluxen pr. arealenhed gennem en homogen væg af tykkelsen d under stationære forhold er givet ved

$$\phi^* = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \tag{4.4}$$

hvor T_2 og T_1 er temperaturerne på overfladerne. Såfremt væggen består af en række af sådanne homogene lag, er fluxen, ϕ, ved stationære forhold naturligvis den samme gennem alle lag. Hverved fremkommer følgende udtryk for den totale varmeflux gennem en væg med arealet A, hvor temperaturen på den indvendige overflade er T_i, og temperaturen af den udvendige overflade er T_u , som

$$\phi = U^{DS} A(T_i - T_u) \tag{4.5}$$

hvor varmetransmissionskoefficienten U^{DS} er givet ved $1/U^{DS} = \Sigma d_i/\lambda_i$, hvor d_i og λ_i er henholdsvis tykkelsen og varmeledningsevnen af det i'te lag. Såfremt væggen består af inhomogene lag bliver fluxen tredimensional. På trods af at (4.5) er udviklet under en antagelse om planparallelle homogene lag, er det almindelig praksis også at anvende (4.5) i tilfælde af inhomogene lag. Dog anvendes en anden procedure ved beregningen af U^{DS} (se eksempelvis [DS418, 1986]). Yderligere er det almindelig praksis at anvende (4.5) i programmer, som er designet for ikke stationære (dynamiske) beregninger. Dette på trods af at (4.5) er formuleret under en antagelse om stationære forhold.

Varmetransport ved fri (termisk drevet) konvektion hidrører fra at massetætheden af varm luft er mindre end massetætheden af kold luft. Som et relevant eksempel kan vi betragte en situation, hvor overfladetemperaturen er lidt højere end temperaturen af rumluften. Luften umiddelbart ved væggen bliver opvarmet ved varmeledning. Som følge af den højere temperatur bliver massetætheden af luften tæt ved væggen mindre end massetætheden af rumluften i øvrigt. Dette betyder, at den varme luft stiger til vejrs, og afløses af koldere luft. Varmeoverførsel ved konvektion beregnes oftest ved

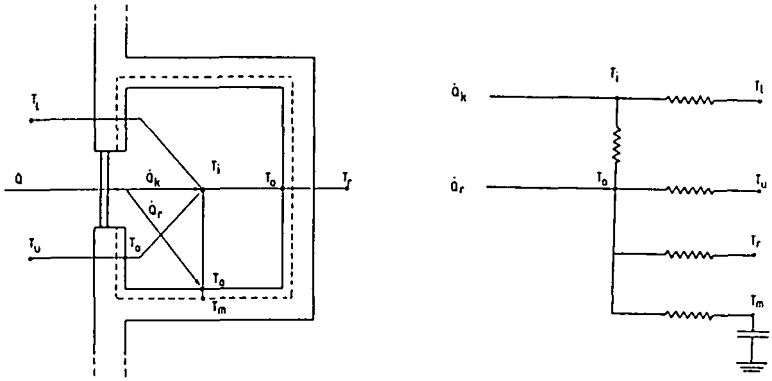
$$\phi = hA\Delta T \tag{4.6}$$

hvor h er konvektionskoefficienten, A arealet af overfladen og ΔT er temperatur differencen mellem vægoverflade og rumluft. Det er meget vanskeligt at beregne værdien af konvektionskoefficienten, idet den afhænger af mange forhold.

I tilfælde af tvungen strømning (f.eks. ventilation og vind) vil konvektionskoefficienten afhænge af hastigheden af den nærliggende luft.

Den sidste mekanisme for varmeoverførsel er stråling. Der optræder nettostråling hvis to legemer i optisk kontakt har forskellig temperatur. I det tilfælde hvor et legeme er totalt omsluttet af et andet legeme, er varmeoverføringen ved stråling mellem legemet med (absolut) temperatur T og omgivelserne ved temperaturen T_s givet ved

$$\phi = Aa\rho(T_s^4 - T^4) \tag{4.7}$$



Figur 4.2: (a) En simplificeret model for bygningers varmedynamik. (b) Et ækvivalent elektrisk kredsløb.

hvor A er overfladearealet af legemet, a er absorptionskonstanten og ρ er Stefan-Boltzmann's konstant. I praksis er varmeoverføringen ved stråling meget vanskelig at beregne. Heldigvis er betydningen af stråling som en mekanisme for varmetransport i bygninger meget begrænset, idet temperaturforskellene oftest er beskedne.

Såfremt en total model for en bygning ønskes, er det næsten umuligt at opstille modellen på grundlag af ovennævnte udtryk for varmeledning, konvektion og stråling. Og selvom en total model kan tilvejebringes på denne måde, er det meget tvivlsomt, om modellen giver en fornuftig beskrivelse. Forklaringen er, at antallet af parametre vil være meget stort - metoden er derfor heller ikke særlig operativ. Yderligere er det meget vanskeligt at udtale sig om nøjagtigheden af den totale model - og nøjagtigheden kan være dårlig på grund af alle de tilnærmelser og simplifikationer, som er introduceret ved submodellerne (f.eks. ved konvektion), og endelig påføres en række approksimationer i sammenkoblingen af de individuelle submodeller. Betragtes den usikkerhed der ligger i en specifikation af varmeledningsevne, kapaciteter, mv., kan det forekomme betænkeligt at basere en total model på en detaljeret beskrivelse af subprocesser.

I stedet er det almen praksis at betragte et simplificeret system. En meget anvendt simplifikation, som resulterer i en første ordens differentialligning, beskrives kort i det følgende. Denne model må tilskrives [Adamson, 1968]. Denne simplifikation anvendes i en række meget anvendte programmer for simulation af bygningers varmedynamik. Den simplificerede model er vist i figur 4.2.

I modellen indgår 3 temperaturer, som refererer til: Rumluften T_i, overfladetemperaturen T_o og temperaturen af det såkaldte varmeakkumulerende medium T_m . De vigtigste simplifikationer er:

- Den totale varmekapacitet er koncentreret i et uendeligt tynd lag i midten af væggen (den stiplede linie i figur 4.2).
- Alle overflader, bortset fra vinduerne, antages at have samme temperatur.
- Der ses bort fra stråling som en mekanisme for varmeoverføring mellem T_i, T_o og T_m.
- Der tages ikke hensyn til varmekapaciteten af rumluften.

Ved at anvende ligning (4.5) for varmeledning og (4.6) for konvektion kan varmebalancen opstilles for rumluften, overfladerne og det varmeakkumulerende lag.

For rumluften er varmebalancen

$$\phi_k + \sum hA_h(T_o - T_i) = Gc_a(T_i - T_l) \tag{4.8}$$

hvor ϕ_k er den konvektive del af varmefluxen fra personer, lys, radiatorer, mv. $\sum hA_h(T_o - T_i)$ er den konvektive varmeoverføring mellem overflader og rumluft, hvor summationen er over det relevante antal overflader. G er mængden af ventilationsluft (fri eller tvungen), c_a er luftens specifikke varmefylde, og T_l er temperaturen af ventilationsluften.

For overfladerne bliver varmebalancen

$$\phi_r = \sum U_1^{DS} A_1(T_o - T_u) + \sum U_2^{DS} A_2(T_o - T_r) + \sum U_3^{DS} A_3(T_o - T_m) + \sum hA_h(T_o - T_i) \tag{4.9}$$

hvor ϕ_r er den del af strålingen fra solen, lys, og radiator, som direkte tilføres overfladerne. De første tre led på højre side udtrykker varmeoverføringen ved ledning fra overfladerne til udeluften, luften i omkringliggende rum, og det varmeakkumulerende lag. Det sidste led er den konvektive varmeoverføring til rumluften. Summationen fortages over det relevante antal overflader.

Endelig er varmebalancen for det varmeakkumulerende lag givet ved

$$c_m \frac{dT_m}{dt} = \sum U_3^{DS} A_3(T_o - T_m) \tag{4.10}$$

hvor c_m er den totale (aktive) varmekapacitet. Varmen tilføres det varmeakkumulerende lag fra overfladerne ved ledning. Bemærk, at størrelserne $1/\sum U_i^{DS} A_i$ og $1/\sum hA_h$ kan betrages som modstande i et ækvivalent elektrisk kredsløb - som illustreret i figur (4.2) (b). Yderligere skal det bemærkes, at (4.8) og (4.9) udtrykker statiske relationer, og kun (4.10) udtrykker en dynamisk relation. Modellen udgør derfor en model med en tidskonstant.

Den ovennævnte formulering anvendes f.eks. i de meget anvendte programmer: tsbi [Grav, 1985], TEMPFO 4 [Andersen, 1974] og BA4 [Lund, 1979] for dynamisk beregninger af bygningers varmedynamik.

Det er værd at bemærke, at såfremt vi introducerer følgende vektor indeholdende alle påvirkninger

$$U = (T_u \; T_l \; T_r \; \phi_k \; \phi_r)^T \tag{4.11}$$

kan ovennævnte ligninger skrives

$$\frac{dT_m}{dt} = aT_m + bU \tag{4.12}$$
$$T_o = c_1T_m + d_1U \tag{4.13}$$
$$T_i = c_2T_m + d_2U \tag{4.14}$$

hvor b, d_1 og d_2 er konstante vektorer, og a, c_1 og c_2 er konstanter. Disse konstanter kan umiddelbart bestemmes på grundlag af konstanterne i (4.8)-(4.10). Det følger umiddelbart af ovenstående at de dynamiske karakteristika beskrives udelukkende ved (4.12), og at de sidste to ligninger ikke er nødvendige for en dynamisk simulation. Såfremt der ønskes et kendskab til overfladetemperaturen, T_o , og rumlufttemperaturen, T_i , kan de bagefter bestemmes af ligningerne (4.13) - (4.14).

I ovennævnte formulering er varmetilførslen til systemet opdelt i en konvektiv del, ϕ_k, og en strålings del, ϕ_r. Da denne opdeling kan være vanskelig at fastlægge på forhånd, kan det være mere bekvemt at inkludere en parameter i modellen som udtrykker denne opdeling. Derved opnås endvidere, at varmetilførslen fra radiatorerne, ϕ_h , og solen, ϕ_s, kan optræde direkte i input-vektoren. Indføres parameteren, p , som den andel af varmetilførslen fra radiatorerne der tilføres konvektivt, haves

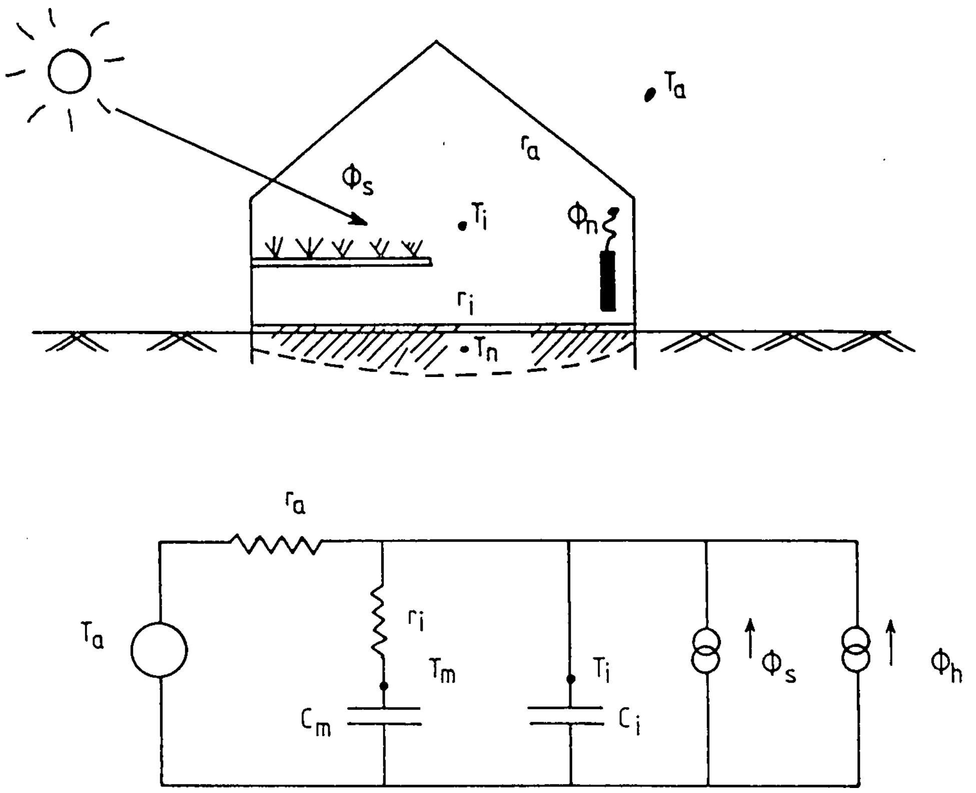
$$\phi_h = p_1\phi_k^h + (1 - p_1)\phi_r^h \tag{4.15}$$
$$\phi_s = p_2\phi_k^s + (1 - p_2)\phi_r^s \tag{4.16}$$

En tilsvarende opdeling kan naturligvis indføres for andre kilder til varmetilførsel.

Den meget simple model (4.12) - (4.14), med kun en tidskonstant, betragtes ofte i litteraturen, se f.eks. [Hammarsten, 1984]. Andre betragter modeller som indeholder mindre modifikationer i forhold til (4.12) - (4.14). [Troelsgaard, 1982] anvender statistiske metoder for at tilvejebringe en model i diskret tid med en tidskonstant, og hun nævner muligheden for at introducere flere tidskonstanter. For en testbygning har [Nielsen og Nielsen, 1984] fundet at modellen med kun en tidskonstant ikke evner at beskrive bygningers korttidsdynamik, som netop er betydningsfuld i reguleringssammenhænge, og de foreslår en model med to tidskonstanter. Statistiske metoder til fastlæggelse af modeller med flere tidskonstanter er beskrivet i [Hansen et al., 1986].

4.1.3 Nogle forslag til modeller for væksthuses varmedynamik.

For bygninger er det erkendt, at en rimelig beskrivelse kræver en model med mindst to tidskonstanter - en tidskonstant, som beskriver langtidsvariationerne og en anden, som beskriver korttidsvariationerne. Ved de traditionelle (deduktive) metoder er det yderst vanskeligt - måske umuligt - at opnå rimelige beskrivelser af korttidsdynamikken. Men med statistiske (induktive) metoder vil det være muligt at beskrive variationerne i hele det område, som dækkes af de givne data. Disse statistiske metoder beskrives senere i afsnit 4.2 og 4.3. I det følgende afsnit opstilles nogle forslag til dynamiske modeller for væksthuses varmedynamik, som indeholder en mulighed for at beskrive både korttids- og langtidsdynamikken.



Figur 4.3: En model for væksthuses varmedynamik med to tidskonstanter, samt et ækvivalent elektrisk kredsløb.

En model med to tidskonstanter.

For et væksthus er det naturligt at forvente, at den lange tidskonstant fysisk udgøres af betongulvene og muligvis den øverste del af jorden. Eventuelt kan det tænkes, at jorden i potterne bidrager til den lange tidskonstant. Den korte tidskonstant udgøres givetvis af luften, eventuelt kombineret med det yderste lag af materialerne (f.eks. planterne og potter). Disse forhold er afspejlet i modellen, som er vist i figur 4.3.

Det analoge elektriske system er også angivet i figuren med henblik på at tydeliggøre modellen. Tilstandene i modellen er temperaturen, T_m, af det varmeakkumulerende medium med varmekapaciteten, c_m, og rumlufttemperaturen, T_i (muligvis inkluderet lidt af materialerne) med varmekapaciteten c_i. Modstanden mod varmeflux til udeluften med temperaturen, T_a, benævnes r_a, medens r_i betegner modstanden mod varmeflux mellem rumluften og det varmeakkumulerende medium.

Væksthusets varmedynamik beskrives ved følgende

$$c_m \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{r_i}(T_i - T_m) \qquad (4.17)$$

$$c_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{r_a}(T_a - T_i) + \frac{1}{r_i}(T_m - T_i) + \phi_s + \phi_h \tag{4.18}$$

Såfremt der findes andre input-signaler kan de naturligvis umiddelbart tilføjes i (4.18). Yderligere, er det muligvis bekvemt at anvende en anden parameterisering. Eksempelvis kan det være mere formålstjenligt at skrive den indkomne solstråling, ϕ_s, som en produktsum af solstrålingen på de respektive facader, multipliceret med de tilsvarende effektive glasarealer. Lader vi $I_{s,i}$ betegne den globale solstråling på den i'te facade og $A_{w,i}$ det tilsvarende effektive glasareal, haves således, at

$$\phi_s = \sum_i A_{w,i} I_{s,i} \tag{4.19}$$

Med målinger af $I_{s,i}$ giver dette en mulighed for en estimation af de effektive glasarealer. Det effektive glasareal er glasarealet korrigeret for skyggevirkninger, absorption, reflektion og direkte gennemgang.

I afsnit 4.3 redegøres der for at modellen (4.17) - (4.18) kan identificeres med statistiske metoder, selvom temperaturen af det varmeakkumulerende medium, dvs. T_m, ikke måles.

En model med tre tidskonstanter.

Ovennævnte model indeholder kun en tidskonstant til at beskrive det varmeakkumulerende medium, som for væksthuse sandsynligvis udgøres af betongulvene og den øverste del af jorden. Det er således en approximation i form af en enkelt tidskonstant af et distribueret system, som, hvad varmelagringen i jorden angår, mere korrekt beskrives af diffusionsligningen (4.2). I tilfælde, hvor det vurderes at denne approximation ikke giver en tilstrækkelig beskrivelse, kan man naturligvis forbedre beskrivelsen ved at opdele det varmeakkumulerende medium i to, dels et øvre lag og et dybereliggende lag. En sådan model er vist på figur 4.4. Ved den yderligere opdeling fås et 3'de ordens system, dvs. et system med tre tidskonstanter, hvoraf de to anvendes til at beskrive dynamikken af det varmeakkumulerende medium.

For denne model bliver ligningerne

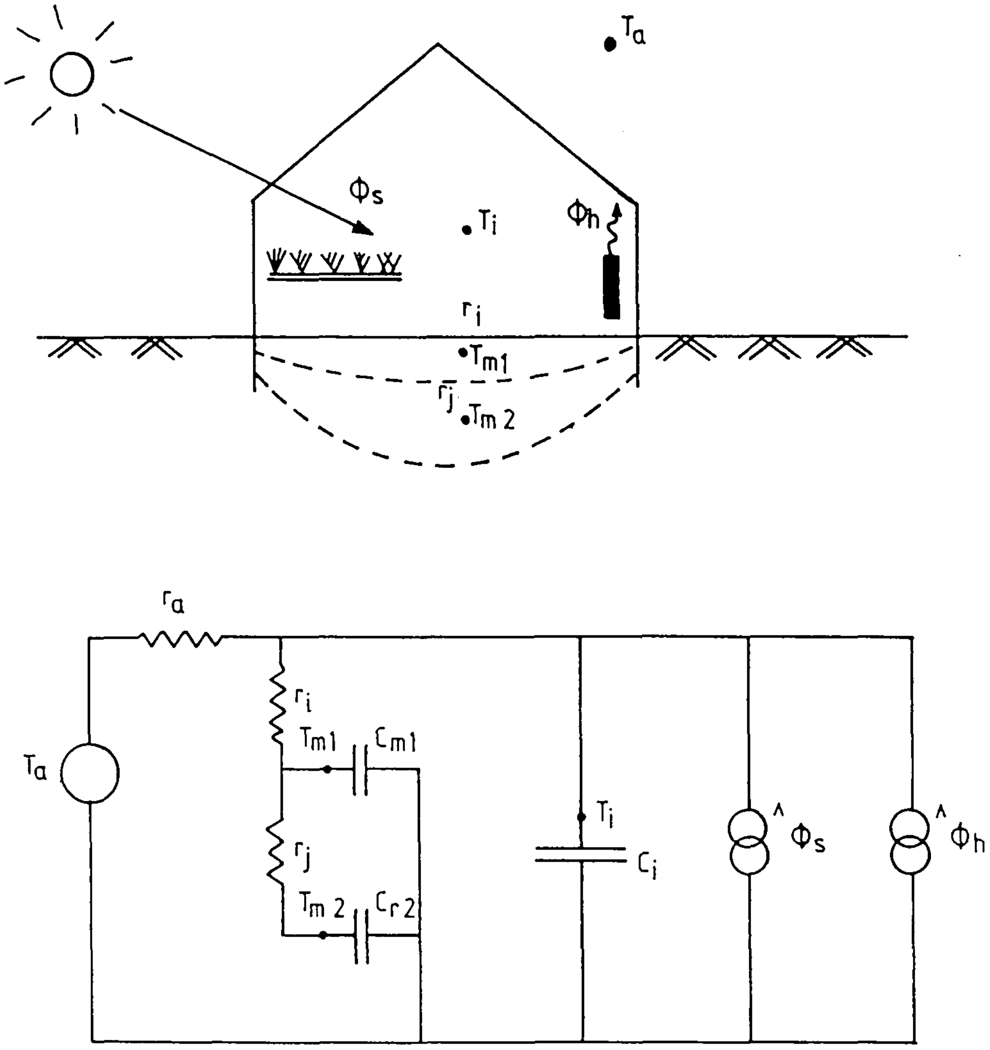
$$c_{m_1} \frac{dT_{m_1}}{dt} = \frac{1}{r_i}(T_i - T_{m_1}) + \frac{1}{r_j}(T_{m_2} - T_{m_1}) \tag{4.20}$$

$$c_{m_2} \frac{dT_{m_2}}{dt} = \frac{1}{r_j}(T_{m_1} - T_{m_2}) \tag{4.21}$$

$$c_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{r_i}(T_{m_1} - T_i) + \frac{1}{r_a}(T_a - T_i) + \phi_s + \phi_h \tag{4.22}$$

Igen kan der naturligvis vælges en anden parameterisering. Såfremt de to (store) varmekapaciteter (c_{m_1} og c_{m_2}) anvendes for at beskrive et homogent distribueret system, f. eks. et tykt betongulv, kan det være rimeligt at antage, at $c_{m_1} = c_{m_2} = c_2$.

De ovenfor nævnte modeller skal kun tjene som eksempler på modeller, som, på grundlag af indledende fysiske overvejelser, forekommer at være rimelige modeller



Figur 4.4: En model for væksthuses varmedynamik med tre tidskonstanter, samt et analogt elektrisk kredsløb.

med henblik på at beskrive både korttids- og langtidsdynamikken i væksthuse. Men der kan naturligvis postuleres andre modeller. Heldigvis kan man anvende de statistiske metoder som omtales i afsnit 4.2 og 4.3 til, sammen med en kendskab til de fysiske mekanismer, at tilvejebringe den mest tilfredsstillende model.

4.2 ARIMA modeller

Dette afsnit indledes med en matematisk beskrivelse af ARIMA processen. ARIMA er en forkortelse for *Auto-Regressive-Integrated-Moving-Average*. Herefter gennemgås forskellige metoder til identifikation og estimation af processen samt input-output modeller.

Analysen af observationer, der stammer fra en tidsserie, begynder med identifikation af modellen—det vil sige, hvilken type ARIMA-proces, der forekommer at være mest sandsynlig. Herefter estimeres parametrene i den valgte model. Sideløbende foretages forskellige undersøgelser af residualerne mm. for at sikre, at den estimerede model er beskrivende for de observerede data. Når en tilfredsstillende model er fundet, kan prædiktionen af fremtidige værdier foretages.

Den generelle reference til dette afsnit er [Box og Jenkins, 1976], hvor disse processer er beskrevet grundigt.

4.2.1 Opskrivning af ARIMA modellen

En stokastisk proces, som er meget nyttig til repræsentation af en række tidsserier, er den *autoregressive model*. I denne model er den aktuelle værdi af processen en funktion af et (endeligt) antal, p, af de foregående værdier i processen samt et støjbidrag. Hvis ϵ_t betegner hvid støj med middelværdi nul og konstant varians, σ_ϵ^2, er Y_t en autoregressiv proces af orden p (forkortet AR(p)) såfremt der gælder, at

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \ldots + \phi_p Y_{t-p} + \epsilon_t \tag{4.23}$$

Lad nu B betegne den bagudrettede forskydningsoperator, givet ved

$$B(Y_t) = Y_{t-1}.$$

Så er, for alle j

$$B^j Y_t = Y_{t-j} \tag{4.24}$$

En autoregressive operator af orden p defineres nu ved udtrykket

$$\Phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \ldots - \phi_p B^p \tag{4.25}$$

hvorved den autoregressive model kan skrives

$$\Phi(B) Y_t = \epsilon_t \tag{4.26}$$

En anden type model, som har stor praktisk interesse, er *moving average modellen.*

Den aktuelle værdi af processen, Y_t, er her en funktion af et (endeligt) antal, q, af de foregående værdier af støjen:

$$Y_t = \epsilon_t - \theta_1\epsilon_{t-1} - \theta_2\epsilon_{t-2} - \ldots - \theta_q\epsilon_{t-q} \tag{4.27}$$

Processen betegnes kort MA(q).

Med moving average operatoren, af q'te orden

$$\Theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \cdots - \theta_q B^q \tag{4.28}$$

kan MA(q) processen kort skrives som

$$Y_t = \theta(B)\epsilon_t \tag{4.29}$$

En MA(q) proces er et eksempel på en **stationær** stokastisk proces, d.v.s. en proces, hvis marginale fordelinger er tidsuafhængige. Dette betyder specielt, at Y_0 og Y_k, har samme fordeling for ethvert k.

Det kan ofte være nødvendigt at inkludere såvel en autoregressive som en moving average proces for at kunne beskrive aktuelle tidsserier. Herved opstår de blandede *autoregressive-moving average modeller*, ARMA(p,q), der er givet ved følgende udtryk:

$$\Phi(B)Y_t = \Theta(B)\epsilon_t \tag{4.30}$$

som udtrykt ved ϵ_t bliver:

$$Y_t = \frac{\Theta(B)}{\Phi(B)} \cdot \epsilon_t \tag{4.31}$$

som altså er en forkortet notation for ligningen

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \cdots + \phi_p Y_{t-p} + \epsilon_t - \theta_1\epsilon_{t-1} - \cdots - \theta_q\epsilon_{t-q} \tag{4.32}$$

Formen (4.31) kaldes også processens "moving-average" form eller "random-chok" fremstilling, idet Y_t skrives som en sum af (i almindelighed uendelig mange) tidligere stokastiske forstyrrelser. Man kan også invertere potensrækken og skrive

$$\frac{\Phi(B)}{\Theta(B)} \cdot Y_t = \epsilon_t \tag{4.33}$$

og taler så om den "autoregresive" fremstilling af ARMA processen Y_t. Det er klart, at der her er forskellige interessante spørgsmål om konvergens af rækkerne. Disse vil kort blive berørt nedenfor.

I praksis vil en lang række tidsserier ikke være stationære, hvilket blandt andet betyder, at observationerne ikke varierer om et fast middelniveau. For at kunne estimere en stationær model, er det nødvendigt at fjerne den instationære variationskilde. I visse situationer kan instationaritet fjernes ved at "differense" et antal gange. Udtrykt ved forskydningsoperatoren B kan en differensning skrives

$$\nabla = 1 - B$$

Antag, at processen Y_t kan gøres stationær ved at anvende ∇ d gange:

$$Z_t = \nabla^d Y_t = (1-B)^d Y_t$$

Hvis den nye stationære proces Z_t er en ARMA(p,q), altså hvis (se ligning 4.31)

$$Z_t = \frac{\Theta(B)}{\Phi(B)} \cdot \epsilon_t \tag{4.34}$$

siges Y_t at være en ***autoregressiv-integrated-moving average proces***, ARIMA (p,d,q). Formelt har man så følgende fremstilling af Y_t:

$$Y_t = \frac{\Theta(B)}{\Phi(B)\cdot(1-B)^d} \cdot \epsilon_t \tag{4.35}$$

Denne klasse af modeller kan således benyttes til beskrivelse af stationære såvel som instationære tidsserier. I praksis vil d ofte være 0, 1 eller højst 2.

Endelig skal den såkaldte sæsonmodel kort omtales.
Til beskrivelse af tidsrækker med ***periodicitet*** kan man betragte den såkaldte ***multiplikative*** (p,d,q)(P,D,Q)$_s$ ***sæsonmodel*** med sæsonperiode s:

$$\Phi(B)\Phi^s(B^s)\,\nabla^d\,\nabla_s^D Y_t = \Theta(B)\Theta^s(B^s)\epsilon_t \tag{4.36}$$

hvor sæsondifferens-operatoren er defineret ved

$$\nabla_s = 1 - B^s$$

og

$$\Phi^s(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \cdots - \Phi_P B^{s\cdot P}$$
$$\Theta^s(B^s) = 1 - \Theta_1 B^s - \cdots - \Theta_Q B^{s\cdot Q}$$

er polynomier i B^s.

Hvis man f.eks. beskriver tidsrækker med døgnsvingninger og timevise observationer vil s=24 være relevant. Disse modeltyper er åbenbart en underklasse af ARIMA klassen, hvor man vælger en særlig form for parametrisering.

For at sikre identificerbarheden af ARMA processer skal serien være ***stationær*** og ***invertibel*** . Populært sagt er processen stationær, hvis koefficienterne i "randomchok" fremstillingen (4.31) går tilpas hurtigt mod nul, d.v.s. at fortidige forstyrrelser ϵ_{t-i} skal have en hurtigt dalende indflydelse. Tilsvarende gælder for invertibilitet, at koefficienterne i den rent "autoregressive" fremstilling (4.33) skal gå tilpas hurtigt mod nul, altså således, at fortidige værdier af processen, Y_{t-i}, ikke har for stor indflydelse.

Formelt gælder, at ARMA(p,q) processen, $\Phi(B)Y_t = \Theta(B)\epsilon_t$ er ***stationær*** , hvis rødderne i polynomiet

$$\Phi(B) = 0$$

ligger udenfor enhedscirklen, og den er ***invertibel***, såfremt rødderne i polynomiet

$$\Theta(B) = 0$$

ligger udenfor enhedscirklen.

4.2.2 Model identifikation.

Ved model-identifikation forstås fastlæggelse af, hvilken orden det er rimeligt at vælge, dvs. bestemme (p,d,q).

Tidsserien differences først d gange, indtil stationaritet er opnået. Identifikation af modellen kan herefter foretages ved udregning og optegning af autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion - evt. også den inverse autokorrelationsfunktion. Disse funktioner benyttes i identifikationen, idet de har forskelligt forløb for de forskellige modeller.

I det efterfølgende betegner Y_t processer, der er korrigeret for middelværdien, således at forventningsværdien af Y_t er nul.

For en stationær stokastisk proces, Y_t haves konstant varians

$$Var(Y_t) = \sigma_Y^2 = E[Y_t^2] \tag{4.37}$$

Kovariansen mellem Y_t og Y_{t+k}, separeret af k tidsenheder, kaldes autokovariansen ved lag k, defineret ved

$$\gamma(k) = Cov[Y_t, Y_{t+k}] = E[Y_t Y_{t+k}] \tag{4.38}$$

Tilsvarende defineres autokorrelationskoefficienten, $\rho(k)$ til lag k ved

$$\rho(k) = \frac{\gamma(k)}{\gamma(0)} \tag{4.39}$$

En afbildning af autokorrelationskoefficienten, $\rho(k)$, som funktion af lag k, kaldes processens autokorrelationsfunktion.

I figur 4.5 er vist et eksempel på en autokorrelationsfunktion. Denne beskriver, hvorledes korrelationen mellem to værdier i tidsserien ændres, når afstanden, k, mellem disse ændres. Autokorrelationsfunktionen er dimensionsløs og derved uafhængig af enheden af observationerne i tidsserien. Da $\rho(k) = \rho(-k)$, er autokorrelationsfunktionen endvidere symmetrisk omkring nul.

I praksis, hvor der haves et endeligt antal observationer, N, af tidsserien, $Y_1, \ldots, Y_N$, estimeres *autokorrelationsfunktionen*, $\rho(k)$, ved

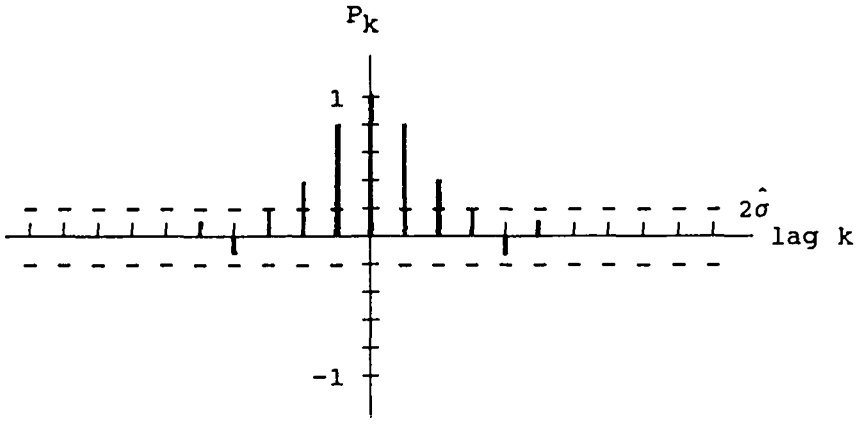
$$r(k) = \widehat{\rho(k)} = \frac{C(k)}{C(0)} \tag{4.40}$$

hvor

$$C(k) = \widehat{\gamma(k)} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^{N-k} Y_t Y_{t+k} \quad k = 0, 1, \ldots, N-1 \tag{4.41}$$

er et estimat af autokovariansen. Det tilhørende skøn for standardafvigelsen bliver

$$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{C_0}$$



Figur 4.5: Den estimerede autokorrelationsfunktion for en tidsserie med $N = 100$ observationer. 95% konfidensgrænserne er indtegnet (- -).

Variansen af den *estimerede autokorrelationsfunktion* er approksimativt, for en hvid støj proces:

$$Var[r(k)] \approx \frac{1}{N}$$

I afbildningen af autokorrelationsfunktionen kan de approksimative 95% konfidensgrænser $\pm 2/\sqrt{N}$ indtegnes. Observerede værdier af $r(k)$, der ligger udenfor disse grænser, er signifikant forskellige fra nul på et 5% niveau. Dette er vist i figur 4.5.

Den teoretiske autokorrelationsfunktion for en MA(q) proces er nul efter lag q, hvorimod en AR(p) proces henfalder langsomt, som en exponentiel/sinus funktion.

Den partielle autokorrelation, φ_{kk}, i lag k er givet ved

$$\varphi_{kk} = Cor[Y_t, Y_{t+k} | Y_{t+1}, \ldots, Y_{t+k-1}] \tag{4.42}$$

og kan udregnes på baggrund af autokorrelationsfunktionen, da der gælder at

$$\varphi_{kk} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho(1) & \cdots & \rho(k-2) & \rho(1) \\ \rho(1) & 1 & \cdots & \rho(k-3) & \rho(2) \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ \rho(k-1) & \rho(k-2) & \cdots & \rho(1) & \rho(k) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho(1) & \cdots & \rho(k-2) & \rho(k-1) \\ \rho(1) & 1 & \cdots & \rho(k-3) & \rho(k-2) \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ \rho(k-1) & \rho(k-2) & \cdots & \rho(1) & 1 \end{vmatrix}} \tag{4.43}$$

Specielt er altså $\varphi_{11} = \rho(1)$, og

$$\varphi_{22} = \frac{\rho(2) - \varphi_{11}\rho(1)}{1 - \varphi_{11}\rho(1)} \tag{4.44}$$

I almindelighed kan φ_{kk} udtrykkes ved

$$\varphi_{11}, \ldots, \varphi_{k-1\,k-1} \text{ og } \rho(1), \ldots, \rho(k)$$

Man kan således, givet autokorrelationerne $\rho(1), \ldots, \rho(k)$, *rekursivt* finde de partielle autokorrelationer $\varphi_{11}, \ldots, \varphi_{kk}$.

Bruges estimaterne for $\rho(k)$ $k = 1, 2, 3..., N-1$, bestemt ved ligning (4.40), får man således estimater for $\varphi_{11}, \ldots, \varphi_{N-1\,N-1}$.

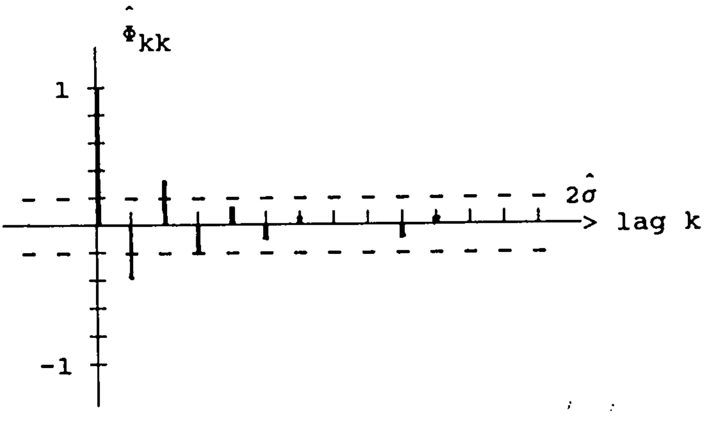
F.eks. får man som estimat for φ_{22}:

$$\widehat{\varphi_{22}} = \frac{r(2) - r(1)^2}{1 - r(1)^2}$$

I figur 4.6 er vist en afbildning af den partielle autokorrelationsfunktion. Som for autokorrelationsfunktionen er variansen for φ_{kk} for hvid støj, approksimativt

$$Var[\widehat{\varphi_{kk}}] \approx \frac{1}{N} \tag{4.45}$$

2σ−grænserne hørende til de approksimative 95% konfidensgrænser er indtegnet på figuren.



Figur 4.6: Den estimerede partielle autokorrelationsfunktion for en tidsserie med N = 100 observationer. 95% konfidensgrænserne er indtegnet (- -)

Den teoretiske partielle autokorrelationsfunktion er nul for en AR(p)-proces efter lag p. I en MA(q) proces henfalder den teoretiske partielle autokorrelation derimod med et approximativt forløb som en eksponentiel/sinus funktion.

I tabel 4.1 er givet en oversigt over forløbet af autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion for en ren AR(p), en ren MA(q) og en blandet ARMA(p,q) proces. Den inverse autokorrelationsfunktion har egenskaber, der ikke afviger væsentligt fra den partielle autokorrelationsfunktion, og er derfor ikke yderligere behandlet her.

4.2.3 Parameter estimation.

Estimation af parametrene i en ren AR(p) proces er forholdsvis enkel. Mere kompliceret bliver det i de blandede ARIMA(p,d,q) modeller.

Parametrene, $\phi_1, \ldots, \phi_p$ i en ren AR(p) proces kan estimeres ved mindste kvadraters metode. En alternativ og lettere metode består i at udnytte, at de p autoregressive parametre, $\phi_1, \ldots, \phi_p$, i en AR(p)-proces opfylder den såkaldte Yule-Walker ligning:

$$\begin{pmatrix} 1 & \rho(1) & \cdots & \rho(p-2) & \rho(p-1) \\ \rho(1) & 1 & \cdots & \rho(p-3) & \rho(p-2) \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ \rho(p-1) & \rho(p-2) & \cdots & \rho(1) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho(1) \\ \rho(2) \\ \vdots \\ \rho(p) \end{pmatrix}$$

Anvendes nu estimatet $r(k)$ for $\rho(k)$ fra ligning (4.40), fås estimater for parametrene ved at løse ovenstående ligningssystem. Hvis antallet af observationer er stort, ligger disse Yule-Walker-estimater tæt ved mindste kvadraters estimater.

For en ren MA(q) proces vil mindste kvadraters metode involvere en mimimering af kvadrat-afvigelsesummen (se ligning (4.27))

$$\sum_{t=1}^{N} \widehat{\epsilon_t^2}$$

hvor $\hat{\epsilon}_t$ er de *empiriske residualer* , der bestemmes rekursivt ved

$$\hat{\epsilon}_t = Y_t + \theta_1 \hat{\epsilon}_{t-1} + \cdots + \theta_{t-q} \hat{\epsilon}_{t-q}$$

Det er her nødvendigt at vælge nogle startværdier for $\hat{\epsilon}_0, \ldots, \hat{\epsilon}_{1-q}$. En simpel mulighed er at sætte dem til 0.

Estimation af blandede ARIMA(p,d,q) modeller foregår ved iterative maximum likelihood procedurer eller ved mindste kvadraters metode, som antydet ovenfor. I teorien leder de to metoder til samme estimater, såfremt der er tale om normale (Gaußiske) processer.

Proces	Autokorrelation	Partiel autokorrelation
ren AR(p)	$\neq 0$, alle k	$= 0$ fra trin $k = p + 1$
ren MA(q)	$= 0$ fra trin $k = q + 1$	$\neq 0$, alle k
ARMA(p,q)	$\neq 0$, alle k, dæmpet svingning	$\neq 0$, alle k, dæmpet svingning

Tabel 4.1: Oversigt over forløbet af autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion for en AR, MA og ARMA proces.

4.2.4 Input-output modeller.

Definitioner

Man taler om en (diskret) ***kausal, lineær input-output model***, når der foreligger en sammenhæng mellem et (diskret) input-signal, U_t, og et (diskret) output-signal, Y_t, af formen

$$Y_t = \sum_{i=0}^{\infty} v_i \cdot U_{t-i} = v(B) \cdot U_t \tag{4.46}$$

hvor altså

$$v(B) = \sum_{i=0}^{\infty} v_i \cdot B^i \tag{4.47}$$

er en symbolsk "operator potensrække" (B er forskydnings operatoren). $v(B)$ kaldes *overførings-funktionen* eller *transfer-funktionen.*

En simpel måde at estimere konstanterne v_i på er at vælge en "enheds-puls" som input:

$$U_t = \begin{cases} 1 \; for \; t = 0 \\ 0 \; t \neq 0 \end{cases}$$

Så bliver åbenbart $v_i = Y_i$ for $i = 0, 1, \cdots$. Af samme grund kaldes transfer-funktionen ofte "impuls-respons" funktionen. Denne fremgangsmåde kræver dog i princippet, at man venter i uendelig lang tid, medens Y_t observeres. I praksis vil man helst estimere et lille antal parametre, og man kan så vælge at nøjes med at se på transfer-funktioner af formen

$$v(B) = \frac{\Omega(B)}{\delta(B)} \tag{4.48}$$

hvor $\Omega(B)$, $\delta(B)$ er *polynomier* i B. I dette specielle tilfælde kan $v(B)$ altså skrives som en *rational* funktion i B. En hyppigt anvendt standard er at sætte

$$v(B) = \frac{\omega_0 + \cdots + \omega_m B^m}{1 + \delta_1 B + \cdots + \delta_n B^n} \cdot B^b$$

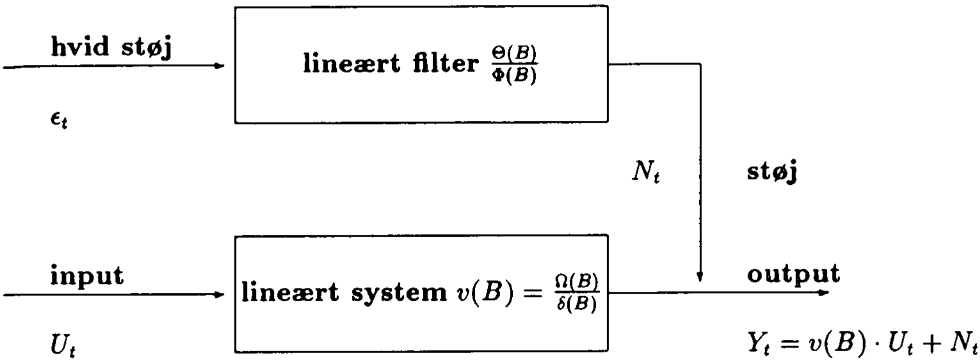
hvor man har sat

$$\Omega(B) = B^b \cdot \omega(B) = B^b \cdot (\omega_0 + \cdots + \omega_m B^m)$$

og sat δ_0 til 1. Faktoren B^b fortolkes som en forsinkelse (på b tidsenheder) af output i forhold til input. "Tænder" man for input til tid 0, vil man først b tidsenheder senere registrere det i output. Er b fastlagt, er der altså $m + 1 + n$ ukendte parametre i transfer funktionen.

Et eksempel på en input-output model er ARIMA(p,d,q) processen, beskrevet i ligning (4.35). Her er input $U_t = \epsilon_t$ og output er Y_t:

$$Y_t = \frac{\Theta(B)}{\Phi(B) \cdot (1 - B)^d} \cdot \epsilon_t$$



Figur 4.7: Diagram af et lineært system med støj

og transfer-funktionen er, udtrykt i symbolsk notation:

$$v(B) = \frac{\Theta(B)}{\Phi(B) \cdot (1 - B)^d}$$

I praksis kompliceres analysen af tidsserien ved tilstedeværelse af en støjproces, N_t, som påvirker den sande relation mellem input og output ved

$$Y_t = v(B)U_t + N_t \tag{4.49}$$

Denne støjproces er ikke nødvendigvis hvid støj, men antages ofte at være *ukorreleret med input-signalet*, U_t. Vi vil antage, at N_t er en ARMA-proces (ligning 4.31):

$$N_t = \frac{\Theta(B)}{\Phi(B)} \cdot \epsilon_t \tag{4.50}$$

hvor ϵ_t er hvid støj med middelværdi nul og varians, σ_ϵ^2. Antager vi yderligere, at transferfunktionen har formen(4.48), får vi følgende:

$$Y_t = \frac{\Omega(B)}{\delta(B)} \cdot U_t + \frac{\Theta(B)}{\Phi(B)} \cdot \epsilon_t \tag{4.51}$$

I figur 4.7 er vist et diagram af processen (4.51).

Estimation

Ved tilstedeværelsen af en støjproces, N_t, af en vis størrelsesorden bliver det noget sværere at estimere transfer funktionen. Estimation af transfer-funktionen kan foretages ved anvendelse af krydskorrelationsfunktionen. Dette svarer til anvendelse af autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion til identifikation af AR(p) og MA(q)-processer.

Lad os antage, at U_t, og dermed også Y_t, er en stationær proces (se afsnit 4.2.1). Krydskovariansen mellem U_t og Y_{t+k} i lag k er givet ved følgende udtryk (vi antager, at input U_t og dermed også output Y_t har middelværdi 0):

$$\gamma_{UY}(k) = Cov[U_t, Y_{t+k}] = E[U_t Y_{t+k}] \ , \ k = 0, 1, 2, \ldots \tag{4.52}$$

og den tilsvarende krydskorrelation i lag k er

$$\rho_{UY}(k) = \frac{E[U_t Y_{t+k}]}{\sqrt{E[U_t U_t] \cdot E[Y_{t+k} Y_{t+k}]}} = \frac{\gamma_{UY}(k)}{\sqrt{\gamma_{UU}(0) \cdot \gamma_{YY}(0)}} \quad k = \ldots, -2, -1, 0, 1, 2, \ldots \tag{4.53}$$

For krydskorrelationen gælder

$$\rho_{UY}(k) = \rho_{YU}(-k)$$

$$|\rho_{UY}(k)| \leq 1$$

Krydskorrelationen mellem U_t og Y_{t+k} estimeres ved

$$r_{UY}(k) = \widehat{\rho_{UY}(k)} = \frac{C_{UY}(k)}{\hat{\sigma}_U \cdot \hat{\sigma}_Y} \tag{4.54}$$

hvor $C_{UY}(k), \hat{\sigma}_U$ og $\hat{\sigma}_Y$ beregnes som i udtrykket 4.41.

Variansen af den således estimerede krydskorrelationen mellem to *ukorrelerede* serier af hvid støj er approksimativt

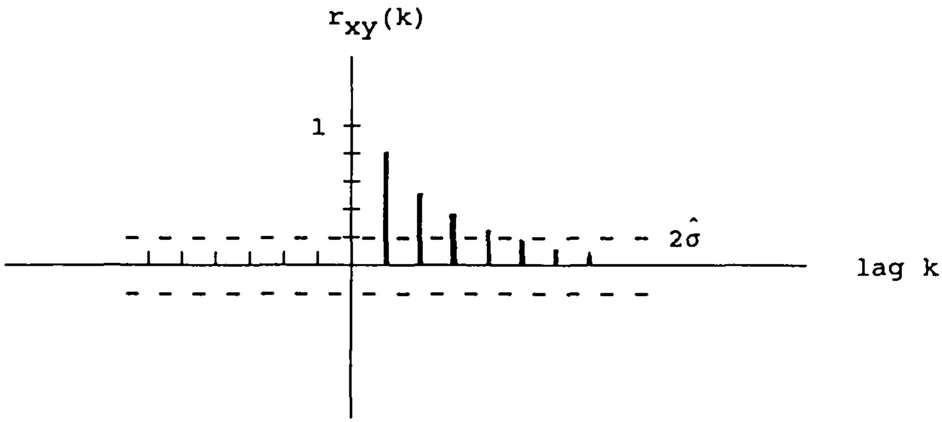
$$Var[r_{UY}(k)] \approx \frac{1}{N}$$

Dette kan benyttes til beregning af f.eks. approksimative 95% konfidensgrænser. I figur 4.8 er vist et eksempel på en estimeret krydskorrelationsfunktion. Ved estimation af parametrene $v_0, v_1, \ldots,$ i modellen

$$Y_t = v(B)U_t + N_t \tag{4.55}$$

benyttes krydskorrelationerne mellem U_t og Y_t. Estimaterne for krydskorrelationerne kan vises at være autokorrelerede, hvorved variansen af disse estimater bliver stor. Dette kan for en tidsserie med mange observationer bevirke, at der estimeres nogle tilsyneladende "store" krydskorrelationskoefficienter, som er fejlagtige. I det tilfælde, hvor man har et lineært system af formen (4.51) kan dette problem bl.a. afhjælpes ved om muligt, inden beregningen af krydskorrelationenerne, at transformere U_t til hvid støj, og derefter "filtrere" output-serien Y_t med den samme transformation. Denne transformation af tidsserierne, før estimation af krydskorrelationen, kaldes *prewhitening*.

Lad os se lidt nærmere på, hvordan det virker.



Figur 4.8: Krydskorrelationsfunktionen med de approksimative 95% konfidensgrænser (- -).

Antag, at input U_t er en ARMA(p,q), middelværdi=0. Så bliver Y_t en stationær proces med middelværdi=0.

$$\Phi_U(B)U_t = \Theta_U(B)\alpha_t \textit{ eller } \alpha_t = \frac{\Phi_U(B)}{\Theta_U(B)} \cdot U_t \tag{4.56}$$

hvor α_t er ***hvid støj***. Output transformeres nu med det samme "filter":

$$\Phi_U(B)Y_t = \Theta_U(B)\beta_t \tag{4.57}$$

eller

$$\beta_t = \frac{\Phi_U(B)}{\Theta_U(B)} \cdot Y_t$$

Det filtrerede output, β_t, er nu i almindelighed *ikke* hvid støj. Hvis vi ganger ligning (4.55) igennem fra venstre med dette filter, og bruger, at multiplikations-operatorerne (som er formelle potensrækker i den variable B) *kommuterer* fås:

$$\beta_t = v(B) \cdot \alpha_t + \varepsilon_t \tag{4.58}$$

hvor

$$\varepsilon_t = \frac{\Phi_U(B)}{\Theta_U(B)} \cdot N_t$$

er en eller anden proces, der er *ukorreleret med* α_t. Krydskorrelationen mellem det filtrerede input, α_t, og det filtrerede output, β_t, beregnes som

$$E[\alpha_{t-k} \cdot \beta_t]$$

Ganger man derfor ligning (4.58) igennem med α_{t-k} og tager dernæst middelværdier:

$$E[\alpha_{t-k} \cdot \beta_t] = E[\alpha_{t-k} v(B) \cdot \alpha_t] + E[\alpha_{t-k} \cdot \varepsilon_t] \tag{4.59}$$

Idet α_t er hvid støj og ukorreleret med ε_t får man så, med notationen fra (4.52) :

$$\gamma_{\alpha\beta}(k) = v_k \cdot \sigma_\alpha^2 \tag{4.60}$$

Hermed har vi fået et udtryk for v_k:

$$v_k = \frac{\gamma_{\alpha\beta}(k)}{\sigma_\alpha^2} = \rho_{\alpha\beta}(k) \cdot \frac{\sigma_\beta}{\sigma_\alpha} \qquad k = 0, 1, 2, \ldots \tag{4.61}$$

v_k estimeres nu ved indsættelse af den estimerede spredning for α og β samt den estimerede krydskorrelation mellem α og β i lag k. Ved afbildning af denne estimerede krydskorrelationen som funktion af k bestemmes modelordenen, og estimaterne af v_k benyttes til foreløbig bestemmelse af graderne af polynomierne $\delta(B)$ og $\Omega(B)$ i (4.51). Når så formen af transfer funktionen er fastlagt, kan en foreløbig estimation af parametre finde sted, f.eks. ved moment metoden.

Næste trin er nu at udregne residualerne $\widehat{N}_t$ og dernæst identificere en ARMA model for denne serie efter principperne i afsnit 4.2.2. Endelig foretages så en samlet estimation af (4.51).

Modelkontrol vil her, udover de i afsnit 4.4 omtalte elementer, involvere et test for uafhængighed mellem input U_t og den estimerede støj ϵ_t.

Estimation af input-output modeller med flere input serier foregår helt efter de samme principper som her omtalt, sålænge de forskellige input er *uafhængige.* " Prewhite"-teknikken kan nemlig direkte anvendes til at estimere de individuelle overføringsfunktioner. Foreligger der imidlertid korrelation, er man overladt til andre fremgangsmåder, når det gælder fastlæggelse af de enkelte overføringsfunktioners orden.

4.3 Identifikation af lineære stokastiske tilstandsmodeller i kontinuert tid.

Dette afsnit beskriver de metoder, der anvendes til at identificere lineære stokastiske tilstandsmodeller i kontinuert tid. Den, der kun er interesseret i de fysiske modeller og resultaterne, kan springe dette afsnit over.

I afsnit 4.1 er der angivet en række mulige modelbeskrivelser for væksthuses varmedynamik i form af ordinære differentialligninger opskrevet på tilstandsform. I matrixnotation er modellerne parameteriseret gennem den lineære tilstandsmodel i kontinuert tid

$$\frac{dT}{dt} = AT + BU \tag{4.62}$$

hvor T er tilstandsvektoren, og U er en vektor med inputsignaler (se evt. afsnit 4.1). Den dynamiske opførsel af systemet er karakteriseret ved matricerne A og B, som udtrykker hvorledes input signalerne (udendørstemperatur, solstråling, varmetilførsel, osv.) påvirker systemet. For en yderligere diskussion af mulige modelstrukturer for væksthuse kan der henvises til afsnit 4.1.

Beskrivelsen (4.62) er kun en model af systemet - og ikke en eksakt beskrivelse. Med henblik på at beskrive afvigelserne mellem (4.62) og de sande sammenhænge introduceres et støjled. Med dette støjled vil modellen være beskrevet gennem den stokastiske differentialligning

$$dT = ATdt + BUdt + dw(t) \tag{4.63}$$

hvor den m'te dimensionale stokastiske proces $w(t)$ antages at være en proces med ortogonale tilvækster. Med det formål at beregne likelihood funktionen vil vi yderligere antage at $w(t)$ er en Wiener proces med tilvækstvariansen $R_1'(t)$.

Som et eksempel på en model i klassen (4.63) (se ligeledes (4.17 og 4.18)) kan anføres følgende eksempel på en model

$$\begin{bmatrix} dT_m \\ dT_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{r_i c_m} & \frac{1}{r_i c_m} \\ \frac{1}{r_i c_i} & -\left(\frac{1}{r_a c_i} + \frac{1}{r_i c_i}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m \\ T_i \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/(r_a c_i) & 1/c_i & A_w/c_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ \phi_h \\ \phi_s \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} dw_m(t) \\ dw_i(t) \end{bmatrix} \tag{4.64}$$

hvor tilstandene er temperaturen, T_i, af lufttemperaturen i væksthuset og T_m er temperaturen af det såkaldte varmeakkumulerende medium, som fysisk givetvis udgøres af jorden i potterne og/eller betongulvene kombineret med en øverste del af jorden. Konstanterne c_m, c_i, r_a, r_i og A_w udgør de ækvivalente termiske parametre, som beskriver de aktuelle termiske karakteristika for væksthuset. Det antages at energien fra solindstrålingen udelukkende går til opvarmning af indeluften.

Ligningen (4.63) beskriver udviklingen for alle tilstande i systemet; men i praksis er det mest sandsynligt at kun nogle af tilstandene måles. Betragtes tilstandsmodellen i (4.64) vil det eksempelvis være rimeligt at antage at kun lufttemperaturen måles; og ikke temperaturen af det varmeakkumulerende medium. I øvrigt vil det givetvis være vanskeligt at finde en måling, som vil være repræsentativ for temperaturen af det varmeakkumulerende medium. I det generelle tilfælde vil vi antage at kun en linearkombination af tilstandene faktisk måles. Indføres T_r som en betegnelse for de tilstande, der rent faktisk måles, haves således

$$T_r(t) = CT(t) + e(t) \tag{4.65}$$

hvor C er en konstant matrix, som angiver den linearkombination af tilstandene, der måles. I mange tilfælde vil C blot bestå af 0 og 1 taller, svarende til de tilstande, der måles. Størrelsen $e(t)$ er målestøjen. Det antages, at $e(t)$ er normal fordelt hvid støj med middelværdien 0 og variansen R_2 . Yderligere antages $w(t)$ og $e(t)$ at være indbyrdes uafhængige. Lad os igen betragte det ovenfor anførte eksempel, hvor systemet beskrives af (4.64). Idet det yderligere antages, at kun indeluften i væksthuset måles, da bliver observationsligningen

$$T_r(t) = [0\ 1] \begin{bmatrix} T_m(t) \\ T_i(t) \end{bmatrix} + e(t) \tag{4.66}$$

hvor $e(t)$ er den måleusikkerhed, der knytter sig til en måling af lufttemperaturen.

4.3.1 Nogle bemærkninger om parameter-identificerbarhed.

Det er et afgørende spørgsmål om alle parametre i tilstandsmodellen kan identificeres. Såfremt en ikke identificerbar model angives, vil de numeriske metoder for estimation, som diskuteres senere, ikke konvergere. Problemet omkring identificerbarheden hidrører fra det faktum, at der for en given transferfunktionsmodel i almindelighed kan opskrives uendeligt mange tilstandsmodeller. Problemet løses ved at knytte begrænsninger til strukturen af tilstandsmodellen, og derved sikre en unik relation mellem parametrene af tilstandsmodellen og transferfunktionsmodellen.

Problemet illustreres i det følgende ved et par eksempler. Lad os først betragte et system svarende til (4.64), som dog er simplificeret, idet udetemperaturen og solstrålingen betragtes værende konstante. Yderligere vil vi kun betragte den deterministiske del af modellen. Hermed kan (4.64) skrives som

$$dT = \begin{bmatrix} -a & a \\ b & -(b+c) \end{bmatrix} T dt + \begin{bmatrix} 0 \\ d \end{bmatrix} \phi_h dt \tag{4.67}$$

Det kan umiddelbart verificeres, at parametrene af den oprindelige model, dvs. c_m, c_i, r_a og r_i, kan identificeres såfremt parametrene a, b, c og d hørende til (4.67) kan identificeres.

Yderligere antages det at kun T_i måles og målestøjen negligeres. Generelt undersøges identificerbarheden ved at betragte overføringsfunktioner hørende til alle input-output relationer i tilstandsbeskrivelsen. Alle disse overføringsfunktioner er at finde i matrix overføringsfunktionen, $G(s)$, hvor s er den variable i den Laplace transformerede, givet ved

$$T_r(s) = G(s)U(s) \tag{4.68}$$

hvor

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B \tag{4.69}$$

I single-input, single-output (siso) tilfældet, som (4.67), bliver overføringsfunktionen, $G(s)$, en skalar funktion. I det betragtede tilfælde, se (4.67), bliver overføringsfunktionen

$$G(s) = \frac{d(s+a)}{s^2 + (a+b+c)s + ac} \tag{4.70}$$

Dette skal sammenlignes med, hvad der reelt observeres, nemlig

$$G(s) = \frac{b_0 s + b_1}{s^2 + a_1 s + a_2} \tag{4.71}$$

Dvs. at b_0, b_1, a_1 og a_2 umiddelbart kan identificeres. Sammenlignes (4.70) og (4.71) kan det ses, at man på baggrund af b_0, b_1, a_1 og a_2 kan finde a, b, c og d. Modellen er derfor identificerbar.

Som et eksempel på en model, som ikke er identificerbar, kan vi anføre følgende model, som udtrykker en mindre ændring i forhold til (4.67)

$$dT = \begin{bmatrix} -a & b \\ c & -d \end{bmatrix} T dt + \begin{bmatrix} 0 \\ e \end{bmatrix} \phi_h dt \tag{4.72}$$

Her bliver overføringsfunktionen

$$G'(s) = \frac{e(s+a)}{s^2 + (a+d)s + (ad - cb)} \tag{4.73}$$

Ved at sammenligne med (4.71) ses, at c og b ikke begge kan identificeres; men kun deres produkt. Dette er dog ikke overraskende, idet model (4.72) indeholder 5 parametre, medens formel (4.71) viser, at kun 4 parametre kan identificeres.

4.3.2 Fra kontinuert til diskret tid.

Observationerne optræder som udfald af en stokastisk proces i diskret tid. Af hensyn til en beregning af likelihood funktionen er det derfor nødvendigt at konvertere systemet fra kontinuert tid til diskret tid. I det aktuelle tilfælde, hvor systemet beskrives ved en lineær stokastisk differentialligning (4.63) er det muligt at foretage en integration, som, under visse antagelser, eksakt beskriver systemet i diskret tid.

For modellen i kontinuert tid, (4.63), kan den tilsvarende model i diskret tid findes simpelthen ved at integrere differentialligningen gennem samplingsintervallet $[t, t+\tau]$. Den samplede version af (4.63) kan derfor skrives

$$T(t+\tau) = e^{A(t+\tau-t)}T(t) + \int_t^{t+\tau} e^{A(t+\tau-s)}BU(s)ds + \int_t^{t+\tau} e^{A(t+\tau-s)}dw(s) \tag{4.74}$$

Under den antagelse, at $U(t)$ er konstant i samplingsintervallet kan den samplede model skrives som følgende tilstandsmodel i diskret tid

$$T(t+\tau) = \Phi(\tau)T(t) + \Gamma(\tau)U(t) + v(t;\tau) \tag{4.75}$$

hvor

$$\Phi(\tau) = e^{A\tau};\ \Gamma(\tau) = \int_0^\tau e^{As}Bds \tag{4.76}$$

$$v(t;\tau) = \int_t^{t+\tau} e^{A(t+\tau-s)}dw(s) \tag{4.77}$$

Under antagelsen at $w(t)$ er en Wiener-proces, bliver $v(t;\tau)$ normalfordelt hvid støj med middelværdi nul og varians

$$R_1(\tau) = E\left[v(t;\tau)v(t;\tau)^T\right] = \int_0^\tau \Phi(s)R_1'\Phi(s)^T ds \tag{4.78}$$

Såfremt samplingsintervallet er konstant kan den stokastiske differensligning skrives

$$T(t+\tau) = \Phi T(t) + \Gamma U(t) + v(t) \tag{4.79}$$

hvor tidsskalaen, uden tab af generalitet, nu er transformeret således at samplingtiden sættes lig en tidsenhed.

4.3.3 Maximum likelihood estimater.

I det følgende antages det, at samplingstiden er konstant, hvilket betyder at det indførte tidsindeks, t, tilhører sættet $\{0, 1, 2, ..., N\}$. N er antal observationer. Med henblik på en opskrivning af likelihood-funktionen introduceres

$$\mathbf{T_r}(t) = [T_r(t), T_r(t-1), \ldots, T_r(1), T_r(0)]^T \tag{4.80}$$

dvs. $\mathbf{T_r}(t)$ er en matrix, som indeholder alle observationer op til og med tidspunktet t. Yderligere indføres θ som en vektor af alle ukendte parametre - inklusive de ukendte variansparametre i R_1 og R_2.

Likelihood-funktionen er den simultane frekvensfunktion for alle observationer for givne parametre, dvs.

$$\begin{aligned} L'(\theta; \mathbf{T_r}(N)) &= p(\mathbf{T_r}(N)|\theta) && (4.81)\\ &= p(T_r(N)|\mathbf{T_r}(N-1), \theta)p(\mathbf{T_r}(N-1)|\theta) && (4.82)\\ &= \left(\prod_{t=1}^{N} p(T_r(t)|\mathbf{T_r}(t-1), \theta)\right) p(T_r(0)|\theta) && (4.83) \end{aligned}$$

hvor successive anvendelser af $P(A \cap B) = P(A|B)P(B)$ er anvendt for at udtrykke likelihood-funktionen, som et produkt af betingede sandsynligheder.

Idet både $v(t)$ og $e(t)$ er normalfordelte, vil de betingede tætheder også være normalfordelinger. Normalfordelingen er fuldstændigt karakteriseret ved middelværdien og variansen. Med henblik på en parameterisering af de betingede fordelinger indføres derfor den betingede middelværdi og den betingede varians som henholdsvis

$$\hat{T}_r(t|t-1) = E[T_r(t)|\mathbf{T_r}(t-1), \theta] \tag{4.84}$$

og

$$R(t|t-1) = V[T_r(t)|\mathbf{T_r}(t-1), \theta] \tag{4.85}$$

Det bemærkes, at (4.84) er ettrins-prediktionen og (4.85) den tilhørende varians. Yderligere er det bekvemt at indføre ettrins-prediktionsfejlen (også kaldet innovationen)

$$\epsilon(t) = T_r(t) - \hat{T}_r(t|t-1) \tag{4.86}$$

Anvendes ligningerne (4.83) - (4.86) bliver den betingede likelihood-funktion (betinget på $T_r(0)$)

$$L(\theta; \mathbf{T_r}(N)) = \prod_{t=1}^{N} \left((2\pi)^{-m/2} det R(t|t-1)^{-1/2} exp(\frac{-1}{2}\epsilon(t)^T R(t|t-1)^{-1}\epsilon(t))\right) \tag{4.87}$$

hvor m er dimensionen af vektoren T_r. Betragtes logaritmen af den betingede likelihoodfunktion fås

$$log L(\theta; \mathbf{T_r}(N)) = \frac{-1}{2}\sum_{t=1}^{N}\left(log\ det R(t|t-1) + \epsilon(t)^T R(t|t-1)^{-1}\epsilon(t)\right) + const. \tag{4.88}$$

Den betingede middelværdi $\hat{T}_r(t|t-1)$ og den betingede varians $R(t|t-1)$ kan beregnes rekursivt ved hjælp af et ordinært Kalman filter. Kalman filtret kan formuleres som bestående af en del til rekursiv beregning af ettrins-prediktioner af tilstandene og en anden del som indeholder en opdatering af dette estimat for systemets tilstande (se f.eks. [Madsen, 1989]). I det aktuelle tilfælde, hvor tilstandbeskrivelsen i diskret tid er givet ved (4.79) og målingerne ved (4.65) kan *Ligningerne for opdatering* af estimatet af tilstanden T skrives

$$\begin{aligned} \hat{T}(t|t) &= \hat{T}(t|t-1) + K_t(T_r(t) - C\hat{T}(t|t-1)) & (4.89) \\ P(t|t) &= P(t|t-1) - K_t R(t|t-1) K_t^T & (4.90) \end{aligned}$$

Her er $P(t|t)$ variansen på estimatet for tilstands vektoren og den såkaldte Kalman-forstærkning, K_t, er givet ved

$$K_t = P(t|t-1)C^T R(t|t-1)^{-1} \tag{4.91}$$

Ligningerne for prediktion er

$$\begin{aligned} \hat{T}(t+1|t) &= \Phi\hat{T}(t|t) + \Gamma U(t) & (4.92) \\ \hat{T}_r(t+1|t) &= C\hat{T}(t+1|t) & (4.93) \\ P(t+1|t) &= \Phi P(t|t)\Phi^T + R_1 & (4.94) \\ R(t+1|t) &= CP(t+1|t)C^T + R_2 & (4.95) \end{aligned}$$

Rekursionerne kræver en angivelse af initialværdier. Det vil være rimeligt at vælge initialværdier (middelværdi og varians) i overensstemmelse med den a priori kendskab der foreligger om systemets tilstande. Lad denne forhåndsviden være givet som

$$\begin{aligned} \hat{T}(1|0) &= E[T(1)] = \mu_0 & (4.96) \\ P(1|0) &= V[T(1)] = V_0 & (4.97) \end{aligned}$$

Kalman filtret anvendes til en rekursiv beregning af de betingede størrelser, der indgår i likelihood funktionen (4.88), som derved kan beregnes for givne parametre. Maximum likelihood estimatet findes derpå som det sæt $\hat{\theta}$, der maximerer likelihood funktionen. Da det ikke er mulig at finde et explicit udtryk for estimatoren, foretages optimeringen numerisk.

Som et grundlag for en vurdering af usikkerheden på de estimerede parametre udnyttes, at ML-estimatoren er asymptotisk normalfordelt med middelværdien θ og variansen

$$D = H^{-1} \tag{4.98}$$

hvor matricen H er givet ved

$$\{h_{lk}\} = -E\left[\frac{\partial^2}{\partial\theta_l\partial\theta_k} L(\theta; \mathbf{T}_r(N))\right] \tag{4.99}$$

Et skøn for D findes ved at erstatte forventningsværdien i (4.99) med den observerede værdi, dvs.

$$\{h_{lk}\} \approx -\left(\frac{\partial^2}{\partial\theta_l\partial\theta_k}L(\theta;\mathbf{T}_r(N))\right)_{|\theta=\hat{\theta}} \tag{4.100}$$

Dette udtryk anvendes som grundlag for en usikkerhedsvurdering af estimaterne.

4.4 Metoder for modelkontrol.

Dette afsnit beskriver kort et par metoder til verifikation af estimerede dynamiske modeller. Metoderne, som er alment kendte fra tidsrækkeanalysen, knytter sig til en forudsætning om stationaritet, og forudsætter ækvidistante samplingintervaller. Gennem modelkontrollen undersøges det, om observationerne på en tilfredsstillende måde kan beskrives ved den estimerede model. Den generelle forudsætning for støjprocesserne, som indgår i de tilstandsbaserede modeller (såvel som ARMA-modeller) er, at innovationsprocessen er hvid støj. En række af de oftest benyttede metoder for modelkontrol har derfor til formål at verificere, at residualerne med rimelighed kan antages at være udfald af en hvid støj proces. I det følgende omtales kort en metode i tidsdomænet, som bygger på autokorrelationen for residualerne, samt en metode i frekvensdomænet, som bygger på periodogrammet for residualerne. For en beskivelse af andre testprocedurer kan der henvises til [Box og Jenkins, 1976] og [Madsen, 1989].

4.4.1 Test i autokorrelationsfunktioner.

Lad $\{\epsilon_t\}$ benævne sekvensen af residualer, og lad $\rho_\epsilon(k)$ være autokorrelationsfunktionen for residualerne. Såfremt $\{\epsilon_t\}$ er hvid støj haves

$$\hat{\rho}_\epsilon(k) \overset{\text{approx.}}{\in} N(0,\frac{1}{N}) \tag{4.101}$$

hvor $N(\mu,\sigma^2)$ er normalfordelingen med middelværdi μ og varians σ^2. N angiver antal residualer, som ofte er lig antal observationer. Yderligere vil de enkelte estimater være indbyrdes uafhængige.

Under anvendelse af (4.101) kan konfidensintervaller for autokorrelationsfunktionen under hypotesen, at $\{\epsilon_t\}$ er hvid støj, beregnes. Oftest optegnes 2σ-grænser svarende til et approximativt 95 % konfidensinterval.

Desuden er det nyttigt også at beregne den partielle autokorrelationsfunktion for residualerne. Her er det en god håndregel, at såfremt autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion for residualerne er næsten identiske, da er modellen tilfredsstillende (- eller mere korrekt: da er det usandsynligt at modellen kan forbedres indenfor rammerne af lineære stationære modeller).

4.4.2 Test i det kumulerede periodogram.

Dette test er specielt anvendelig for konstatering af periodiske variationer i residualerne, som derfor bør inddrages i modellen. Det kumulerede periodogram er et test for hvid støj i frekvensdomænet.

For frekvenserne $f_i = i/N, i = 0, 1, \ldots, [N/2]$ beregnes periodogrammet for residualerne som

$$\hat{I}(f_i) = \frac{1}{N}\left[\left(\sum_{t=1}^{N} \epsilon_t cos 2\pi f_i t\right)^2 + \left(\sum_{t=1}^{N} \epsilon_t sin 2\pi f_i t\right)^2\right] \tag{4.102}$$

hvilket er en frekvensdomænebeskrivelse af variationerne af $\{\epsilon_t\}$, idet $I(f_i)$ angiver hvor stor en del af variationerne af $\{\epsilon_t\}$, som kan tillægges frekvensen f_i.

Det normerede kumulerede periodogram fås som

$$\hat{C}(f_i) = \left(\sum_{j=1}^{i} \hat{I}(f_j)\right) / \left(\sum_{j=1}^{[N/2]} \hat{I}(f_j)\right) \tag{4.103}$$

Periodogrammet er en ikke-aftagende funktion defineret for frekvenserne $f_i = i/N, i = 0, 1, \ldots, [N/2]$.

For hvid støj haves at variationerne er ligelig fordelt på alle frekvenser (se f.eks. [Madsen, 1989]), hvorfor det teoretiske periodogram er konstant. Endvidere er den totale variation ved N observationer lig $N\sigma_\epsilon^2$, hvorfor det teoretiske periodogram for hvid støj er

$$I(f_i) = 2\sigma_\epsilon^2 \tag{4.104}$$

Det teoretiske kumulerede periodogram $C(f_i)$ for hvid støj er derfor en ret linie fra punktet $(0, 0)$ til $(0.5, 1)$ - se (4.103). Såfremt residualer er et udfald af en hvid støj proces, vil man derfor vente, at det estimerede kumulerede periodogram grupperer sig om denne rette linie. Et 95 % konfidensinterval er givet ved

$$[i/r - 1.36/\sqrt{r},\ i/r + 1.36/\sqrt{r}] \tag{4.105}$$

hvor $r = [N/2]$ og $i = 0, 1, \ldots, [N/2]$. Hypotesen om hvid støj må afvises (på 5 % signifikansniveau), såfremt det estimerede kumulerede periodogram blot for en enkelt værdi falder udenfor konfidensgrænserne (Der er tale om et Kolmogorov-Smirnov test).

4.5 Relationer mellem overføringsfunktions- og tilstandsform.

Lad os betragte tilstandsmodellen

$$T(t+1) = \Phi T(t) + \Gamma U(t) + v(t) \tag{4.106}$$
$$Y(t) = CT(t) + e(t) \tag{4.107}$$

hvor $\{v(t)\}$ og $\{e(t)\}$ er indbyrdes ukorreleret hvid støj med varianserne henholdsvis R_1 og R_2.

Anvendes z-tranformationen ([Madsen, 1989]) fås

$$zT(z) = \Phi T(z) + \Gamma U(z) + v(z) \quad (4.108)$$
$$Y(z) = CT(z) + e(z) \quad (4.109)$$

Ved at eliminere $T(z)$ i (4.108) - (4.109) fås

$$Y(z) = C(zI - \Phi)^{-1}\Gamma U(z) + C(zI - \Phi)^{-1}v(z) + e(z) \quad (4.110)$$

Denne form kaldes input-output-, transferfunktions- eller overføringsfunktionsformen. Såfremt $\{Y_t\}$ er stationær (og systemet stabilt) kan støjkomponenterne i (4.110) samles i én støjkomponent [Goodwin og Payne, 1977], og vi kan skrive

$$Y(z) = C(zI - \Phi)^{-1}\Gamma U(z) + [C(zI - \Phi)^{-1}K + I]\epsilon(z) \quad (4.111)$$

eller

$$Y(z) = H_1(z)U(z) + H_2(z)\epsilon(z) \quad (4.112)$$

hvor $\{\epsilon_t\}$ er hvid støj med variansen R og

$$H_1(z) = C(zI - \Phi)^{-1}\Gamma \quad (4.113)$$
$$H_2(z) = C(zI - \Phi)^{-1}K + I \quad (4.114)$$

Matricen K er den stationære Kalman-forstærkning, og R bestemmes på grundlag af R_1, R_2, Φ og C, idet

$$K = \Phi PC^T(CPC^T + R_2)^{-1} \quad (4.115)$$
$$R = CPC^T + R_2 \quad (4.116)$$

hvor P bestemmes af Ricatti ligningen

$$P = \Phi P\Phi^T + R_1 - \Phi PC(CPC^T + R_2)CP\Phi^T \quad (4.117)$$

Man kan således på basis af en given tilstandsform finde den tilsvarende overføringsfunktionsform ved at eliminere tilstandsvektoren. Tilsvarende må man indføre (vælge) en tilstandsvektor, såfremt man ønsker at gå fra overføringsfunktionsform til tilstandsform. Her findes i almindelighed uendeligt mange muligheder, idet tilstandsformen ikke er unik (se f.eks. [Madsen, 1989]).

4.5.1 Beregning af tidskonstanter

Betragt den kontinuerte og tilhørende diskrete tilstandsmodel, ligning(4.62) og (4.106):

$$\frac{dT}{dt} = AT + BU$$

hhv. (samplingstiden vælges som tidsenhed)

$$T(t+1) = \Phi T(t) + \Gamma U(t) + v(t)$$

hvor

$$\Phi = e^{A} \quad og \quad \Gamma(\tau) = \int_0^{\tau} e^{As} B ds.$$

Hvis A's egenværdier er $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$ bliver Φ's egenværdier $e^{\lambda_1}, \ldots, e^{\lambda_n}$. Systemet er stabilt, hvis real-delene af A's egenværdier alle er negative. Dette svarer til, at Φ's egenværdier ligger inde i enhedscirklen.

Lad os tage en reel, negativ egenværdi, λ, for A, med multiplicitet 1. Den til den normerede egenvektor knyttede linear kombination af tilstandsvariablene vil da, hvis det fysiske system ikke udsættes for påvirkninger, bevæge sig mod en ligevægtstilstand via et eksponentielt henfald *med tidskonstant* $\tau = -1/\lambda$. Er $\rho = e^{\lambda}$ den tilhørende egenværdi for Φ, har vi nu

$$\tau = -1/\ln(\rho) \tag{4.118}$$

Men ρ er rod i Φ's karakteristiske polynomium, som netop optræder i transfer funktionen (4.113). Når den angivne matrix $(zI - \Phi)$ inverteres, får man netop på hver plads i matricen $(zI - \Phi)^{-1}$ en brøk, hvis nævner er determinanten af $(zI - \Phi)$. Men det er jo netop det karakteristiske polynomium for Φ (med z som variabel).

Vi ser altså, at enhver komponent i transfer-matricen $H_1(z)$ består af en rational funktion i z, hvis nævner er Φ's karakteristiske polynomium.

Er transferfunktionen givet, kan man altså i princippet finde tidskonstanterne for systemet v.h.a. udtrykket (4.118). Får man et par af komplekse rødder, svarende til en dæmpet svingning af systemet, skal man indsætte $|\rho|$ i (4.118).

Kapitel 5

Operationelle klimamodeller.

I forbindelse med en regulering eller simulering af bygningers varmedynamik, er det formålstjenligt at udnytte hvorledes exogene variable, såsom solstrålingen og udetemperaturen, varierer. For væksthuse er dette specielt betydningsfuldt, idet indflydelsen fra klimaet er mere direkte for væksthuse end for almindelige bygninger.

Med henblik på en forbedret regulering af væksthuse er det derfor af stor betydning at kunne udnytte korttidsforudsigelser af klimaet (måske op til 6 timer frem). Dette forventes at have særlig stor betydning ved pludselige, men forudsigelige, skift i klimaet, som f.eks. ved solopgang. Forudsigelserne skal tilvejebringes løbende. Derfor er det vigtigt at modellerne, som anvendes til forudsigelserne, er relativt simple og velegnede til reguleringsformål. På grundlag af data fra Årslev opstilles i dette kapitel eksempler på sådanne operationelle modeller for udetemperaturen.

I litteraturen findes en række eksempler på operationelle klimamodeller, som kan tænkes at være velegnede til korttidsforudsigelser med henblik på en forbedret regulering af varmetilførslen til bygninger. Her kan nævnes [van Passen, 1981], [Madsen, 1985], [Madsen et.al., 1987], [Gringorten, 1966] og [Degelman, 1976]. I [van Passen, 1981] og [Madsen, 1985] opstilles modeller for blandt andet udetemperaturen, solstrålingen og vindhastigheden. Der er tale om modeller, som beskriver den indbyrdes afhængighed mellem klimavariablene. Disse modeller kan dog ikke anvendes direkte, idet de skal tilpasses til forholdene på den aktuelle lokalitet. For en omfattende beskrivelse af danske klimamålinger kan der henvises til [Hansen et.al, 1981], som beskriver de jordbrugsmeteorologiske observationer fra klimastationen Højbakkegård ved Tåstrup. I [Holst et.al., 1987] findes en beskrivelse af hvorledes løbende korttidsforudsigelser af klimaet kan anvendes til en forbedret regulering af varmetilførslen til en bygning.

De operationelle modeller for udetemperaturen, der opstilles i det følgende , er ikke velegnede til simuleringsformål, idet årstidsvariationen ikke er beskrevet. For reguleringsformål er dette af mindre betydning, idet årstidsvariationen i modellerne kan følges ved at estimere modellerne rekursivt under anvendelse af en såkaldt glemselsstruktur.

I afsnit 5.1 er der givet en kort beskrivelse af de analyserede data. Afsnit 5.2 beskriver identifikationen af de operationelle modeller, og endelig diskuteres modellernes mangler og fordele i afsnit 5.3.

5.1 Beskrivelse af data

De analyserede data er målt i perioden fra 6. marts 1988 til 30. april 1988 på Institut for Væksthuskulturer, Statens Planteavlsforsøg i Årslev. Den geografiske placering er 55° 18′ 29″ nordlig bredde, og 10° 26′ 53″ østlig længde.

Data foreligger som timegennemsnit baseret på målinger hver 10. minut, dvs. at en observation er gennemsnittet af 6 samplinger. Der foreligger således 1345 timevise observationer.

- *Globalstråling* [W/m^2] er målt med et Kipp & Zonen solarimeter, range 300-2500 nm, der er placeret på rygningen af et væksthus.
- *Udetemperatur* [$^\circ$ C] er målt med en pt100 termoføler, placeret 2 meter over jordoverfladen i en meteorologisk hytte.

Den indbyrdes placering af instrumenterne fremgår af figur 6.2 på side (94).

5.2 Estimerede modeller

I det følgende opstilles modeller til beskrivelse af variation i de to klimavariable: Udetemperatur og global stråling.

Den tre-delte procedure–identifikation, estimation og kontrol, der er anvist i afsnit (4.2) om ARIMA modeller, vil gå igen i afsnittene 5.2.1 og 5.2.2.

I afsnit 5.2.1 er der foreslået forskellige modeller til beskrivelse af variationen i udetemperaturen. De er alle karakteriseret ved, at være rene ARIMA-modeller.

I afsnit 5.2.2 identificeres og estimeres en "input-output"-model for udetemperaturen, hvor den globalstrålingen optræder som "input".

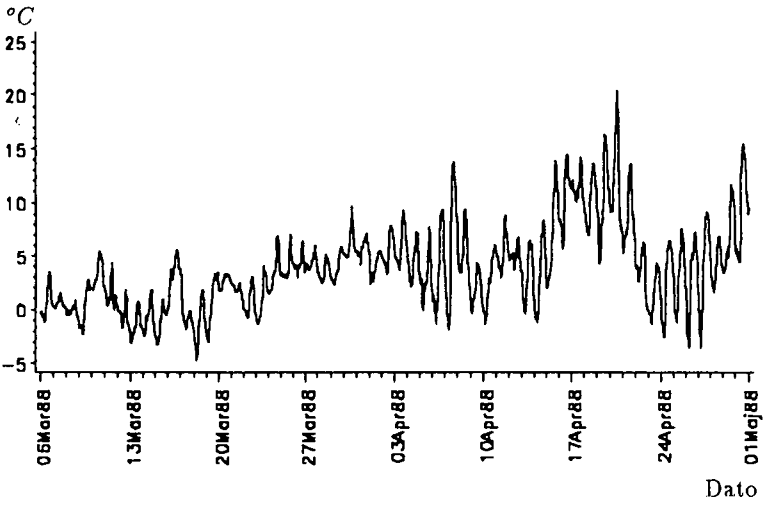
5.2.1 Model for udetemperatur

Identifikation

På figur 5.1 er udetemperaturen i perioden 6. marts 1988 til 30. april 1988 afbildedet. Som det fremgår af figuren, indgår der en periodisk komponent i udetemperaturen, hvor periodelængden er et døgn. Det bemærkes ligeledes, at udetemperaturen er en træg proces, dvs. langsomt varierende indenfor de enkelte perioder. Endelig kan det tyde på, at der er en generel tendens til, at niveauet stiger i perioden.

På figurerne 5.2 og 5.3 er den estimerede autokorrelationsfunktion $\hat{\rho}_k$ og den estimerede partielle autokorrelationsfunktion $\hat{\phi}_{kk}$ afbilledet.

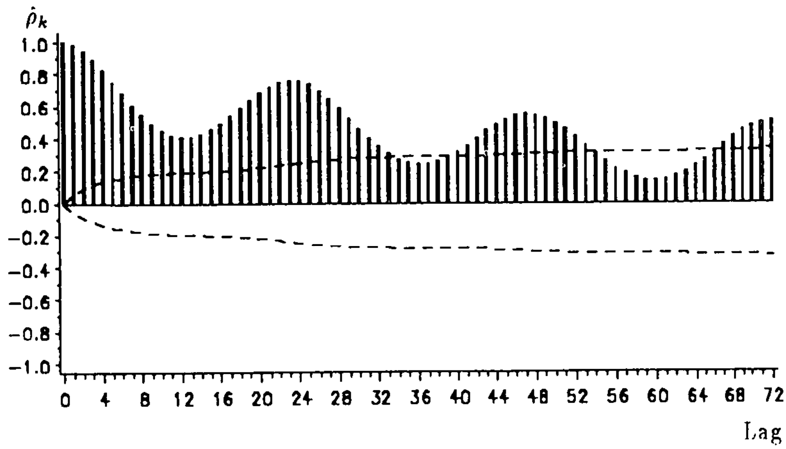
Som det fremgår af figurerne understøtter $\hat{\rho}_k$ og $\hat{\phi}_{kk}$ den kvalitative beskrivelse af varianskomponenterne i udetemperaturen.



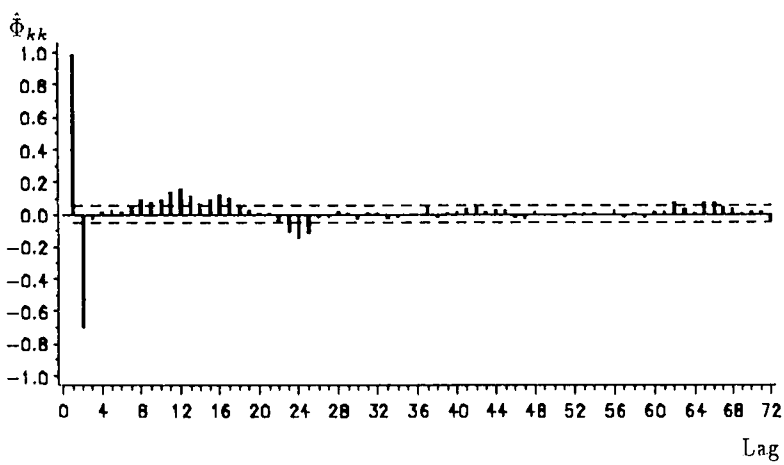
Figur 5.1: Udetemperatur i perioden 6 marts 1988 til og med 30 april 1988.

$\hat{\rho}_k$ er således en eksponentielt dæmpet harmonisk svingning med perioden 24. Det meget langsomme eksponentielle henfald af $\hat{\rho}_k$ kan være en indikation af en instationaritet. Dette understøttes af figur 5.3, hvor $\hat{\phi}_{kk}$ antyder en autoregresiv parameter i lag 1, der ligger meget nær 1.0 og som kunne vise sig at være en pol på enhedscirklen.

Ovenstående overvejelser leder således frem til, at en model for udetemperaturens variationer dels skal beskrive den døgnmæssige variation, dels den langsomme lokale variation indenfor de enkelte døgn. En multiplikativ $(p, d, q) \times (P, D, Q)_{24}$ sæsonmodel kunne således vise sig at være passende til beskrivelse af udetemperaturen.



Figur 5.2: Estimeret autokorrelationsfunktion for udetemperaturen.



Figur 5.3: Estimeret partiel autokorrelationsfunktion for udetemperaturen.

Estimation

Nedenfor er angivet forskellige modeller til beskrivelse af udetemperaturen. Som det fremgår er modellerne meget ens, idet det varierende element består i, hvorvidt man foretager en almindelig førsteordens differensning, for at fjerne den lineære trend. Eller hvorvidt man vælger at beskrive denne trend ved hjælp af en AR-parameter. Derudover er det et spørgsmål om man foretager en sæsondifferensning for at fjerne sæsonvariationen, eller om man søger at beskrive sæsonvariationen ved hjælp af et multiplikativt sæson AR-led.

$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2)(1-B)(1-B^{24})T_t = (1-\Theta_1 B^{24})\epsilon_t \quad (5.1)$$
$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2-\phi_3 B^3)(1-B^{24})T_t = (1-\Theta_1 B^{24})\epsilon_t \quad (5.2)$$
$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2)(1-B)(1-\Phi_1 B^{24})T_t = (1-\Theta_1 B^{24})\epsilon_t \quad (5.3)$$
$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2-\phi_3 B^3)(1-\Phi_1 B^{24})T_t = (1-\Theta_1 B^{24})\epsilon_t \quad (5.4)$$

Nedenfor i tabel 5.1 er parameter-estimaterne for de specificerede modeller opført.

Parameter		Model 5.1	Model 5.2	Model 5.3	Model 5.4
ϕ_1	Estimat	0.665429	1.6386	0.681632	1.65541
	SEE	0.026911	0.0269909	0.0270259	0.0271241
ϕ_2	Estimat	-0.162101	-0.797592	-0.15566	-0.805011
	SEE	0.0268789	0.0472844	0.0269142	0.0476328
ϕ_3	Estimat		0.135924		0.127688
	SEE		0.0269372		0.0270487
Φ_1	Estimat			0.985179	0.981305
	SEE			0.00869209	0.00976597
Θ_1	Estimat	0.902644	0.906406	0.896394	0.886787
	SEE	0.014247	0.0141531	0.0224852	0.0233542
$\hat{\sigma}_\epsilon^2(°C)^2$		0.204851	0.199982	0.203551	0.199523

Tabel 5.1: Parameter-estimater for ARIMA-modeller til beskrivelse af variationerne i udetemperaturen. SEE står for standard afvigelse på estimaterne.

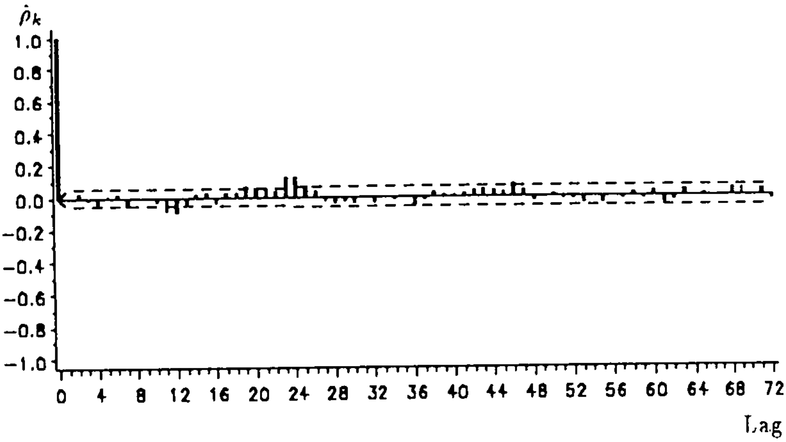
Som det er at forvente, er parameterestimaterne meget ens, ligesom modellernes forklaringsevne stort set også er den samme.

Dette hænger sammen med, at i de tilfælde, hvor modellen indeholder tre AR-led til at beskrive den lokale variation, vil der være en rod meget nær 1.

Det fremgår ligeledes af tabel 5.1, at i de tilfælde, hvor sæsonvariationen søges beskrevet ved et multiplikativt AR-led fås et parameterestimat, der ligger meget nær 1.

Modelkontrol

Figurerne 5.4 og 5.5 viser den estimerede autokorrelationsfunktion $\hat{\rho}_k$ og den estimerede partielle autokorrelationsfunktion $\hat{\phi}_{kk}$ for residualerne for udetemperaturen, når



Figur 5.4: Estimeret autokorrelationsfunktion for residualerne til udetemperaturen.

den beskrives ved model (5.4).

Man bemærker, at ingen af korrelationsfunktionerne har flere signifikante værdier, end det kan forventes med det viste 5%-niveau.

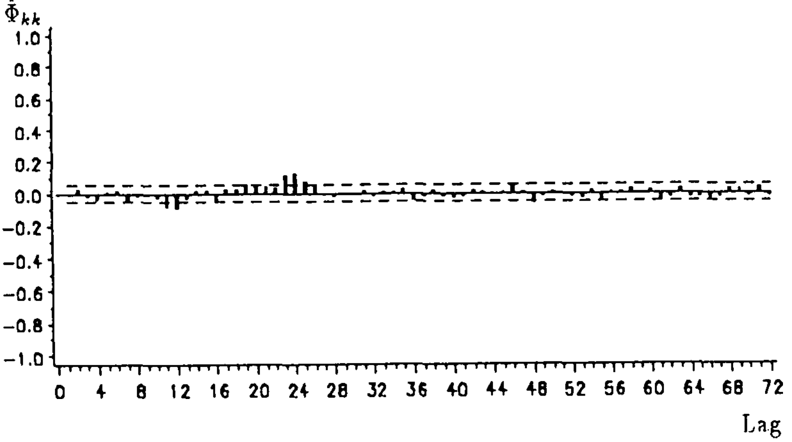
Omvendt virker de signifikante værdier i lag 23 og 24 meget iøjnefaldende. Der er dog ikke noget begrundet håb om, at det er muligt at forbedre modellerne indenfor den anvendte modelklasse, idet udseendet af autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion stort set er ens.

På figur 5.6 er det kumulerede periodogram for residualerne afbilledet. Heraf fremgår, at der ikke umiddelbart er signifikante frekvenser tilbage i residualerne. Der ses dog at være en ganske stor tilvækst i det kumulerede periodogram omkring vinkelfrekvensen 0.25. Da der er tale om timevise observationer skal en eventuel døgnvariation i residualerne findes ved vinkelfrekvensen $2\pi/24 = 0.26$. Det må derfor konkluderes, at der tilsyneladende er en smule systematisk døgnvariation tilbage i residualerne. Dette vil vi senere fjerne ved at inddrage strålingen som en exogen variabel.

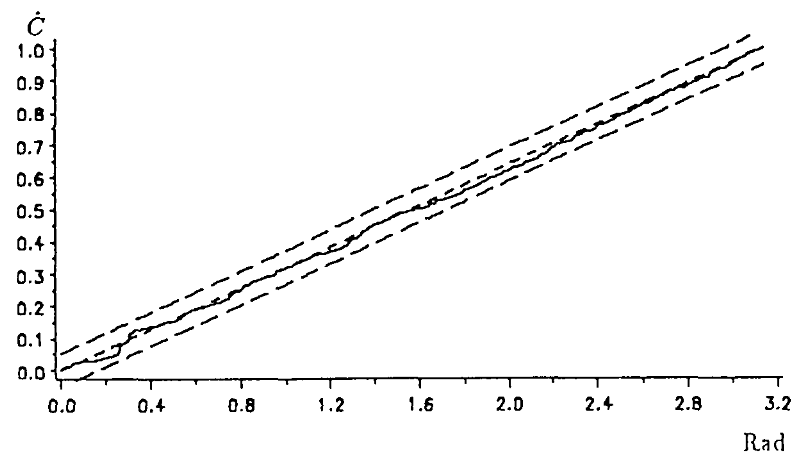
For at give et indtryk af modellernes evne til at prediktere udetemperaturen, er der på figurer 5.7 vist ettrinsprediktionen af udetemperaturen sammen med den målte udetemperatur. Som det fremgår af figuren, er der pæn overensstemmelse.

5.2.2 Input-output-model for udetemperatur

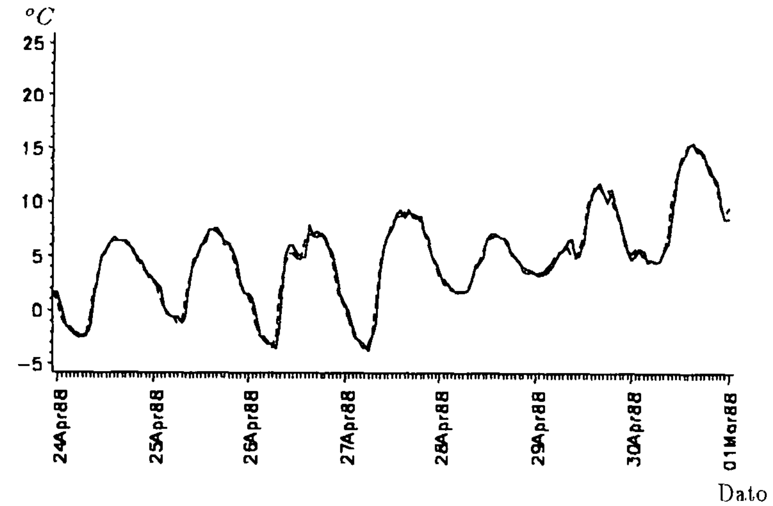
Solstrålingen har stor indflydelse på forløbet af udetemperaturen. I figur 5.8 ses forløbet af globalstrålingen i forsøgsperioden. På figuren iagttages naturligvis en kraftig døgnvariation, samt en svag trend i løbet af perioden. På figur 5.9 er global-



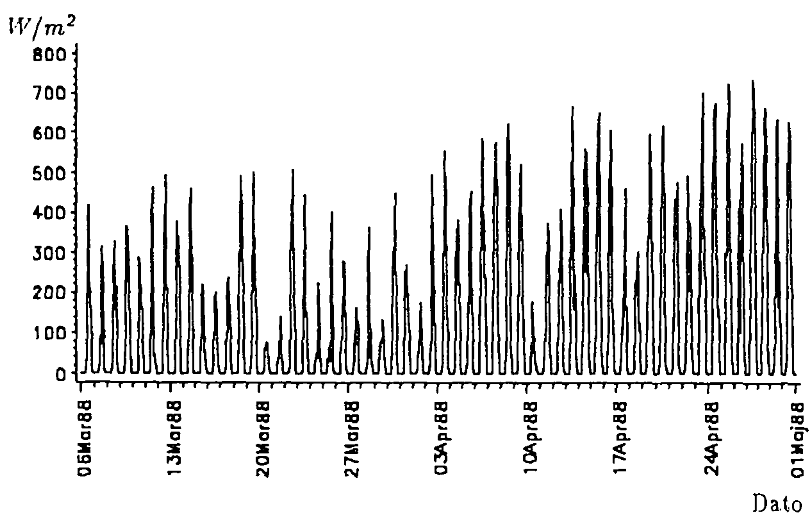
Figur 5.5: Estimeret partiel autokorrelationsfunktion for residualerne til udetemperaturen.



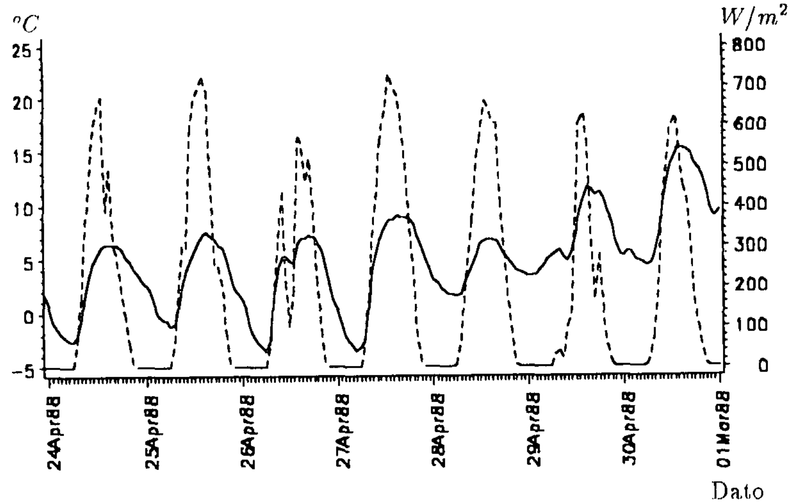
Figur 5.6: Normeret kumuleret periodogram for residualerne til udetemperaturen.



Figur 5.7: Predikteret (—) og observeret (- - -) udetemperatur i perioden 24 april 1988 til og med 30 april 1988.



Figur 5.8: Globalstråling i perioden 6. marts til og med 30. april 1988



Figur 5.9: Udetemperatur (——) og global stråling (- - -) i perioden 24 April 1988 til og med 30 April 1988.

stråling og udetemperatur afbildedet samtidig. Der observeres en tidsforsinkelse fra solindstrålingen til udetemperaturen.

Det er således nærliggende, at prøve at forbedre de i 5.2.1 fundne modeller for udetemperaturen, ved at inddrage og udnytte den information, der ligger i kendskab til globalstrålingen.

I dette afsnit bestemmes en "input-output"-model til beskrivelse af variationen i udetemperaturen, med globalstrålingen som "Input". Der henvises til afsnit 4.2.4.

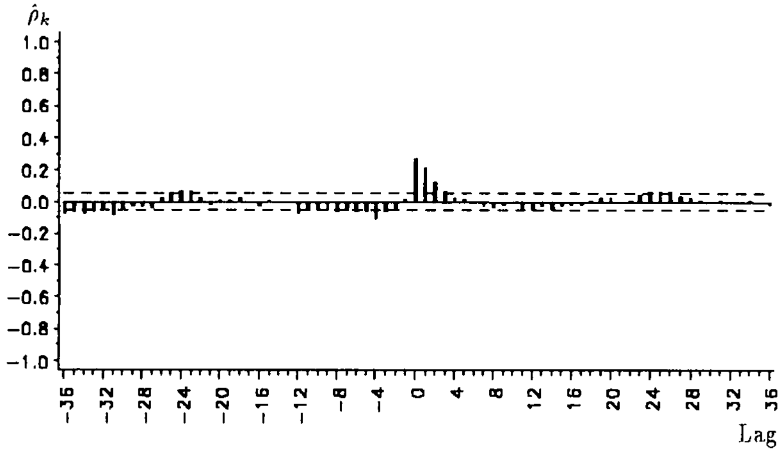
Herved opnås dels, at den resulterende model bliver simplere og lettere at give en fysisk fortolkning, dels opnås, at forklaringsgraden forbedres med ca. 20% i forhold til modellerne i 5.2.1.

Identifikation

Første trin i bestemmelsen af en "input-output"-model, eller som den også kaldes "transfer"-funktionsmodel, er identifikation og estimation af impulsrespons funktionen eller "transfer"-funktionskomponenten. Denne beskriver den funktionelle sammenhæng mellem "input"—global stråling, og "output"—udetemperaturen.

Når "transfer"-funktionskomponenten er bestemt, benyttes samme teknik som i det foregående afsnit, til at identificere og estimere modeller for restvariation i udetemperaturen.

Ved identifikationen af "transfer"-funktionskomponenten udnyttes, at impulsresponsfunktionen pånær en konstant faktor er lig krydskovariansfunktionen, såfremt "Input" er hvid støj. Derfor estimeres først et filter for globalstrålingen, og dette



Figur 5.10: Estimeret krydskorrelationsfunktion for udetemperatur og global stråling.

benyttes til at "pre-white" både globalstråling og udetemperatur. På residualerne efter denne filtrering er den estimerede krydskorrelationsfunktion beregnet, hvilket ses i fig 5.10.

Af figur 5.10 fremgår, at dersom globalstrålingen ændrer sig, vil dette have en vis øjeblikkelig effekt på udetemperaturen. Derudover vil effekten falde efter et nærmest eksponentielt forløb, for efter tre til fire timer at være forsvindende.

Forløbet ovenfor er typisk for et lineært system med en impulsresponsefunktion af formen

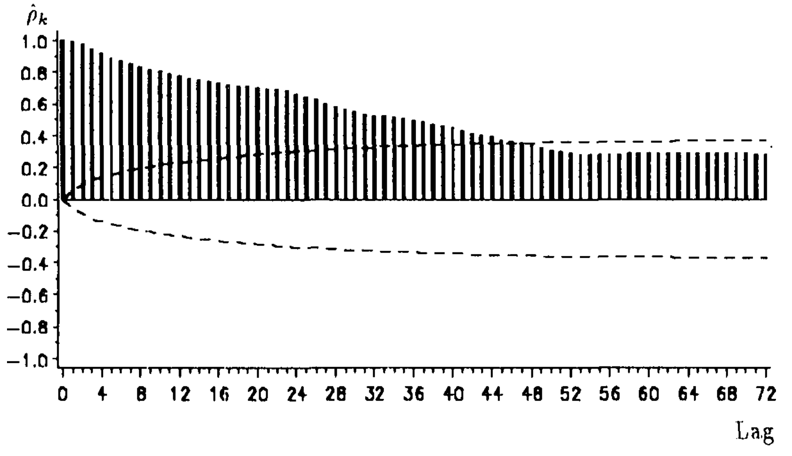
$$\frac{\omega_0}{1+\delta B} \tag{5.5}$$

eller eventuelt

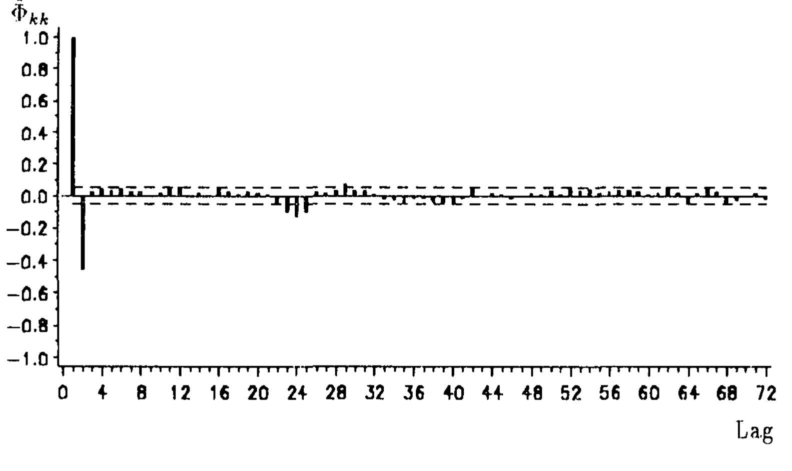
$$\omega_0 + \omega_1 B + \omega_2 B^2 + \omega_3 B^3 \tag{5.6}$$

Søges udetemperaturen modelleret som "output" fra et lineært system med impulsresponsfunktionen (5.5) og den globale stråling som "input" bliver autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion for residualerne som vist på figurerne 5.11 og 5.12.

Af figurerne 5.11 og 5.12 fremgår det, at restvariationen indeholder et kraftigt autoregressivt led. Den svage dæmpning af $\hat{\rho}_k$ i figur 5.11 og den kraftige partielle autokorrelation i lag 1 på figur 5.12 antyder tilsammen, at restvariationen har en pol meget nær enhedscirklen. Det ville således være nærliggende, at fjerne denne tilsyneladende instationaritet ved hjælp af en første ordens differensning. En differensning medfører imidlertid også at man frasiger sig en vigtig dynamisk karakteristik i form af en tidskonstant, der er tilgængelig via polerne i "input-output"-modellen. Dette er grunden til, at differensning undlades i det følgende.



Figur 5.11: Estimeret autokorrelationsfunktion for residualerne i udetemperaturen.



Figur 5.12: Estimeret partiel autokorrelationsfunktion for residualerne i udetemperaturen.

Parameter		Model 5.7	Model 5.8	Model 5.9	Model 5.10
ϕ_1	Estimat	1.50482	1.52761	1.56347	1.61323
	SEE	0.023629	0.0232019	0.0225784	0.0211892
ϕ_2	Estimat	-0.52291	-0.542449	-0.58477	-0.631133
	SEE	0.0236077	0.0232268	0.0225346	0.0212258
Φ_1	Estimat	0.216836		0.253743	
	SEE	0.0274385		0.0275305	
ω_0	Estimat	0.00370747	0.00378998	0.00333296	0.00344681
	SEE	0.000162517	0.000153849	0.00018383	0.000185077
ω_1	Estimat			0.00261145	0.00278148
	SEE			0.000192983	0.000191901
ω_2	Estimat			0.00130298	-0.0013758
	SEE			0.000183387	0.000184991
δ_1	Estimat	-0.750531	-0.751612		
	SEE	0.0203327	0.0177162		
$\hat{\sigma}_\epsilon^2(°C)^2$		0.159552	0.167002	0.168155	0.178427

Tabel 5.2: Parameterestimater for "input/output"-modeller.

Den partielle autokorrelationsfunktion kan ligeledes antyde, at der er en svag døgnvariation tilbage.

Estimation

Til beskrivelse af variationen i udetemperaturen er der i modellerne (5.7) - (5.10) opført forskellige "Input/Output"-modeller. Som man kan se, er de alle variationer over følgende to temaer:

1. Bruger man "transfer"-funktionskomponent af formen (5.5) eller en af form som (5.6) ?

2. Forsøges en eventuel døgnvariation beskrevet ved hjælp af et multiplikativt autoregresivt sæsonled?

Hvorvidt man vælger den ene eller den anden løsning vil imidlertid afhænge af den aktuelle situation.

Dette vendes der tilbage til i afsnit 5.3

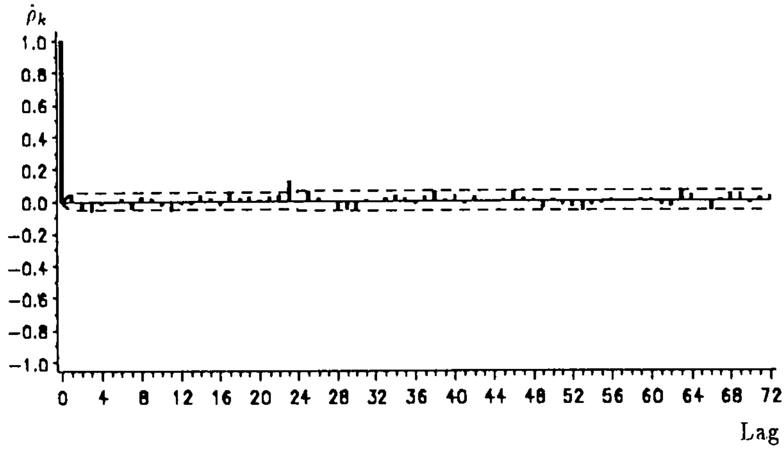
Parameterestimationerne for modellerne (5.7) - (5.10) er opført i tabel 5.2.

$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2)(1-\Phi_1 B^{24})\left[T_t-\left(\frac{\omega_0}{1+\delta_1 B}\right)I_t\right] = \epsilon_t \qquad (5.7)$$

$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2)\left[T_t-\left(\frac{\omega_0}{1+\delta_1 B}\right)I_t\right] = \epsilon_t \qquad (5.8)$$

$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2)(1-\Phi_1 B^{24})\left[T_t-(\omega_0+\omega_1 B+\omega_2 B^2)I_t\right] = \epsilon_t \qquad (5.9)$$

$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2)\left[T_t-(\omega_0+\omega_1 B+\omega_2 B^2)I_t\right] = \epsilon_t \qquad (5.10)$$



Figur 5.13: Estimeret autokorrelationsfunktion for residualerne til udetemperaturen.

Modelkontrol

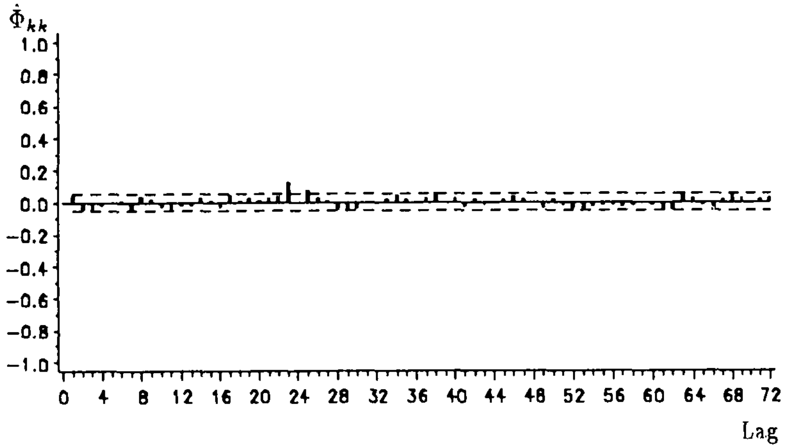
For at kunne vurdere modellernes evne til at beskrive variationen i udetemperaturen er på figurerne 5.13 og 5.14 vist henholdsvis den estimerede autokorrelations-funktion og den estimerede partielle autokorrelationsfunktion for residualerne til ettrinsprediktionen, når udetemperaturen søges beskrevet ved model (5.7)

Som det fremgår af figurerne, er der stort set ingen korrelation tilbage i residualerne til ettrinsprediktionerne. Det er således meget få værdier af både $\hat{\rho}_k$ og $\hat{\phi}_{kk}$, der falder uden for det optegnede 5% niveau. Det ser ud som om, der er en korrelation i lag 23, der ikke er beskrevet af modellen. Men da udseendet af $\hat{\rho}_k$ og $\hat{\phi}_{kk}$ stort set er ens, er det ikke sandsynligt, at modellen kan forbedres inden for rammerne af lineære stationære modeller.

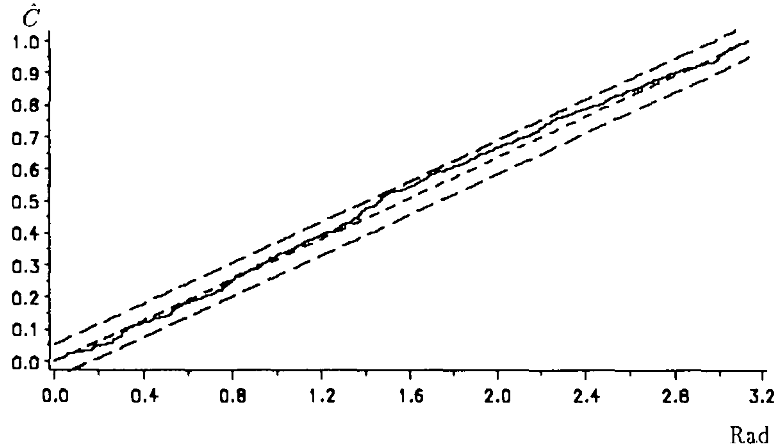
Det normerede kumulerede periodogram på figur 5.15 indikerer ligeledes , at der ikke er periodiske variationer i residualerne. Sammenlignes med den tidligere fundne model uden exogen variabel ses, at den systematiske døgnvariation nu er fjernet, hvilket givetvis skyldes, at strålingens tilstedeværelse i modellen giver en bedre beskrivelse af variationerne af udetemperaturen. Der er således ikke umiddelbart grund til ikke at acceptere en beskrivelse af udetemperaturen ved modellerne (5.7) - (5.10).

5.3 Diskussion

Som afrunding på nærværende kapitel vil de estimerede modeller her blive resumeret og deres formåen diskuteret.



Figur 5.14: Estimeret partiel autokorrelationsfunktion for residualerne til udetemperaturen.



Figur 5.15: Normerede kumulerede periodogram for residualerne til udetemperaturen.

Som sammenligningsgrundlag bruges de i [Madsen, 1985] tilsvarende modeller.

Diskussionen af modellerne leder naturligt til en række forslag til forbedring af de bestemte modeller, eller til forslag om yderligere data til beskrivelse af udeklimaet.

I afsnit 5.2.1 konstateredes, at udetemperaturen i perioden 6. marts 1988 til 30. april 1988 udviser, dels en markant døgnvariation, dels en i perioden voksende tendens i det generelle niveau. Tendensen til at udetemperaturen stiger igennem perioden skyldes naturligvis det specielle tidsrum af året, som er undersøgt—nemlig forårsmånederne.

Den tydelige døgnvariation må også delvis tilskrives årstiden. Dette hænger sammen med, at solen, i forhold til vintermånederne, er kommet til at stå højere på himlen med den deraf øgede gennemslagskraft.

Årstidens indflydelse via bl.a. solen ses på figur 5.8. Man bemærker, at døgnvariationen bliver mere udpræget igennem perioden i takt med at globalstrålingen intensiveres. Det skal også her understreges, at de her behandlede modeller ikke er velegnede til at beskrive variationen hen over et helt år. Dette betyder imidlertid mindre for reguleringsformål, da man blot vil tage højde for årstidsvariationen ved at estimere modelparametrene løbende.

Til at beskrive variationen i udetemperaturen er der bl.a. foreslået følgende modeller[1]:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)\nabla\nabla_{24} T_t = (1 - \Theta_1 B^{24})\epsilon_t \qquad (5.11)$$

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3)(1 - \Phi_1 B^{24}) T_t = (1 - \Theta_1 B^{24})\epsilon_t \qquad (5.12)$$

hvor T_t er den middelværdi-korrigerede udetemperatur, og ϵ_t antages at være normalfordelt hvid støj.

For begge modeller gælder, at restvariationen $\hat{\sigma}_\epsilon^2$ er i størrelsesordenen $(0.45°\mathrm{C})^2$, og således ikke direkte kan bruges som mål for, om man skal foretrække den ene model frem for den anden.

Valget afhænger af den aktuelle situation, og om man generelt er tilfreds med modellernes evne til at beskrive udetemperaturen.

Er dette tilfældet, bør man nok vælge model (5.11), dels på grund af det mindre antal parametre, men nok så meget fordi, der i differensningen ligger en erkendelse af, at man, med hensyn til stationaritet, befinder sig på gyngende grund.

Sammenligner man modellerne ovenfor med de i [Madsen, 1985] bestemte ARIMA-modeller for udetemperaturen:

$$(1 - 1.56B + 0.58B^2)T_t = (0.62 - 0.56B)10^{-2}Rn_t + (1 - 0.13B - 0.12B^2)\epsilon_t \quad (5.13)$$

hvor Rn_t er nettostrålingen. Overføringsfunktionernes poler er

$$p_1 = 0.9835$$
$$p_2 = 0.5935$$

[1] Parameterestimater er givet i tabel 5.1 side 75.

Følgende bemærkes:

- Den estimerede varians der findes med (5.13) er $(0.615°C)^2$, hvilket er noget større end hvad der findes med (5.11) og (5.12). Det kan bl.a. skyldes, at data til (5.13) er indsamlet over 14 år, og derfor indeholder en væsentlig årsvariation. Dette problem er mere begrænset i den her undersøgte kortere periode.

- Til trods for den store forskel i længden af de to undersøgte perioder og de forskelle dette måtte betyde, fås principielt set ens modeller.

Erkender—eller anderkender—man derimod, at solen, som nævnt ovenfor, har stor indflydelse på udetemperaturen, og ønsker man at inddrage den information, der ligger i globalstrålingen, så kan (5.12) være udgangspunkt for en model for støjdelen i en "transfer"funktionsmodel.

Konklusionen på afsnit 5.2.1 må således være, at ønsker man at beskrive udetemperaturen med en ren ARIMA-model, vil det være passende med en multiplikativ ARIMA $(2,1,0) \times (0,0,1)_{24}$ sæsonmodel.

Denne model beskriver 98.76% af udetemperaturens oprindelige variation på $(4.068°C)^2$.

Som ovenfor antydet, er det dog muligt, at opnå en bedre beskrivelse af udetemperaturen,ved at inddrage globalstrålingen i modellen. Dette er gjort i afsnit 5.2.2. "Transfer"-funktionskomponenten i den resulterende "input-output"-model bestemmes ved hjælp af den estimerede krydskorrelation mellem den "prewhitede" globale stråling og den filtrerede udetemperatur.

Blandt de mulige "Input-output"-modeller nævnes[2]:

$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2)(1-\Phi_1 B^{24})\left[T_t-\left(\frac{\omega_0}{1+\delta B}\right)I_t\right]=\epsilon_t \tag{5.14}$$

der har en varians $\hat{\sigma}_\epsilon^2 = (0.3994°C)^2$, hvilket er 20% mindre end variansen af den multiplikative $(2,1,0) \times (0,0,1)_{24}$ sæsonmodel.

For den generelle "input-output"-model

$$\phi(B)\Phi(B)\left[T_t - v(B)I_t\right] = \theta(B)\Theta(B)\epsilon_t \tag{5.15}$$

hvor $\phi(B)$, $\Phi(B)$, $\theta(B)$ og $\Theta(B)$ er polynomier i B af orden p, P, q og Q gælder, at rødderne i polynomiet

$$\tilde{A}(B) = B^{(p+P)}\phi(B^{-1})\Phi(B^{-1}) \tag{5.16}$$

er poler i de uforkortede overføringsfunktioner fra I_t og ϵ_t til T_t, og rødder i det karakteristiske polynomium i en tilstandsmodel der modsvarer (5.15).

For modellen (5.14) fås polerne

$$\begin{aligned} p_1 &= 0.9603 \\ p_2 &= 0.5445 \\ p_{24} &= 0.9383\, e^{ik2\pi/24};\ k = 0, 1, ..., 23 \end{aligned}$$

[2] Parameterestimater er givet i tabel 5.2 side 82

hvor p_{24} er den multiple rod hørende til det autoregresive sæsonled.

Der er en simpel sammenhæng mellem en positiv pol p_i og den i et kontinuert tilstandssystem svarende tidskonstant τ_i, idet man har:

$$\lambda_i = -\ln(p_i) \tag{5.17}$$
$$\tau_i = \lambda_i^{-1} = (-\ln(p_i))^{-1} \tag{5.18}$$

hvor λ_i er egenværdierne i transitionsmatricen i det kontinuerte tilstandssystem.

Polerne ovenfor svarer således til tidskonstanterne:

$$\begin{aligned}
\tau_1 &= 24.67\,h \\
\tau_2 &= 1.645\,h \\
\tau_{24} &= 15.70\,h
\end{aligned}$$

Ved formuleringen af en "input-output"-model tages i [Madsen, 1985] udgangspunkt i en allerede formuleret kontinuert model. Herved sikres at "input-output"-modellen har en fornuftig fysisk parallel med tilsvarende rimelige tidskonstanter. Det er således naturligt, at vurdere modellen (5.14) i forhold til "referencemodellen" i [Madsen, 1985].

En sammenligning imellem de omtalte modeller giver anledning til følgende kommentarer:

- Som det var tilfældet med den rene ARIMA-model, er der en ikke uvæsentlig forskel mellem de estimerede varianser $\hat{\sigma}_\epsilon^2$. I [Madsen, 1985] fås således $\hat{\sigma}_\epsilon^2 = (0.47^o\mathrm{C})^2$. Denne forskel må som tidligere nævnt primært tilskrives den store forskel på længden af de perioder data er indsamlet over. Dog kan forskellen i parameterisering heller ikke helt ignoreres.

- Betragtes overføringsfunktionernes poler og de tilhørende tidskonstanter, ser man, at den pol, der svarer til den store tidskonstant i [Madsen, 1985] ($p_1 = 0.9835$), i modellen (5.14) spaltes i to poler, der ligger nærmere centrum. I [Madsen, 1985] konstateres noget tilsvarende ved en udvidelse af (5.13) til et 3'-ordens system, og dette forklares med:

  > "This is probably due to the fact that the true system is a continuous distributed system of heat capacities and conductors."

  hvilket der nok ikke er nogen grund til at drage i tvivl, da det ville være en smule optimistisk at antage, at man kan beskrive en kompleks proces som den klimatiske ved hjælp af et 2'- eller 3'-ordens system. Hermed er dog ikke sagt, at et sådant ikke kan opfylde behovet i en given situation.

  Hvad angår polen nærmest centrum er resultaterne meget sammenlignelige, og svarer i begge tilfælde til en tidskonstant mellem 1.5 og 2 timer.

Overføringsfunktionen fra globalstrålingen til udetemperaturen har en tidsforsinkelse, der kan beregnes til 2 timer og 20 minutter, for et inputsignal med perioden 24 timer. Dette er måske lige i overkanten af, hvad man skulle forvente for dagtimerne. Men da nattimerne også indgår, med en globalstråling der praktisk taget er nul, og en udetemperatur der falder jævnt gennem alle nattimerne, må det siges at være en rimelig tidsforsinkelse.

5.3.1 Alternative modeller

Det er ikke rimeligt at beskrive globalstrålingen ved en lineær stokastisk proces. Dette hænger sammen med den kraftige kobling, der er mellem den globale stråling og solens højde på himlen. I stedet kan man udnytte, at solhøjden er deterministisk. Betragter man således differensprocessen mellem den maximalt opnåelige stråling givet solhøjden og den observerede stråling, kan denne i dagtimerne opfattes som et udtryk for skydækket. Da bevægelser i skydækket ikke begrænser sig til dagtimerne, vil der være mere forsvarligt, at modellere denne proces som resultat af en stokastisk proces.

Ved at betragte globalstrålingen som en funktion af solhøjden og skydækket vil der også være et begrundet håb om, at man kan beskrive døgn- og årstidsvariationer.

Ud over de her behandlede to klimavariable kunne der være andre, der ville være interessante i forbindelse med et væksthus eller som har afgørende indflydelse på udeklimaer. To nærliggende ville være nedbør og vindhastighed. Ligeledes kunne man forestille sig, at man er interesseret i en opspaltning af solens stråling, således at man ikke blot har global stråling, men f.eks. også diffus stråling og nettostråling som i [Madsen, 1985].

Endelig skal nævnes muligheden at bevæge sig over i andre modelklasser. I det foregående er kun univariate eller "single input-single Output"-modeller uden tilbagekobling. I det virkelige system vil der være tilbagekobling mellem de forskellige parametre. Dersom man ønsker at beskrive sådanne forløb, må man benytte multivariate modeller med tilbagekobling. Spørgsmålet er så om man vil betragte sådanne modeller som operative.

Kapitel 6

Væksthuses varmedynamik

6.1 Beskrivelse af dataopsamling og forsøgsdesign

6.1.1 Væksthus

De efterfølgende beregninger af væksthusets varmedynamik er baseret på data opsamlet indeni og udenfor et væksthus på Institut for Væksthuskulturer i Årslev.

Det benyttede hus har et grundareal på 8 m x 21.5 m. Den bærende konstruktion er stålrammer indstøbt i en 80 cm høj sokkel. Huset er dækket med et enkelt lag glas lagt i aluminiumssprosser med en sprosseafstand på ca. 80 cm. I huset er installeret et skyggegardin.

I forsøgsperioden har huset været fyldt med potteplanter. Disse har stået på 4 langsgående rulleborde, hver på ca. 1.6 m x 18.0 m. Der er tre varmesystemer i huset: I bordene, under bordene samt trempel/top.

Huset er orienteret med gavlene mod øst og vest, og har i sydlig, vestlig og nordlig retning været omgivet af andre væksthuse. Afstandene i nævnte tre retninger er henholdsvis 16 m, 7 m og 20 m. Mellem husene samt mod øst har der været græs, dog med en mindre del flisebeklædte adgangsveje og -stier (figur 6.2).

For en nærmere beskrivelse henvises til [Amsen og Frøsig, 1985], hvor det benyttede hus er beskrevet som hus nr. 1.

6.1.2 Forsøgsdesign

Energitilførslen har været styret efter to forskellige principper:

Konventionel styring.

Som et led i et andet forsøg har energitilførslen i vinteren 88/89 og foråret 89 været reguleret med henblik på at holde en forud fastlagt temperatur. I dette forsøg anvendtes varmesystemet under bordene ikke. Der har været styret efter en temperatur på 14°C om dagen og 22°C om natten. Luftning ved vinduesåbning er påbegyndt ved henholdsvis 28 og 36°C (dag og nat). Fra dette forsøg blev der opsamlet data med et samplingsinterval på 2 min. i perioden 24. marts til 12. april 89.

PRBS-styring.

For bedre at kunne estimere varmedynamikken har der været udført et forsøg, hvor energitilførslen er fastlagt efter en forudgående tidsplan. Ifølge denne plan kan energitilførslen enten være afbrudt eller også antage en maximal værdi, hvor den maximale værdi er fastlagt således, at væksthusets rumtemperatur forventes at svinge omkring et passende gennemsnit. I gennemsnit har energitilførslen været afbrudt i halvdelen af tiden. For at undgå, at potteplanterne i væksthuset tog varig skade af for høje eller for lave temperaturer, er ovennævnte tidsplan for energitilførslen dog modificeret således, at energitilførslen stoppes ved en rumtemperatur over 35 °C, samtidig med at vinduerne åbnes. Ligeledes tilkobles energitilførslen ved rumtemperaturer under 10 °C.

Da forsøget blev udført i en periode med potentiel høj indstråling , var skyggegardinerne trukket ca. 80% for under hele forsøget (dag og nat) for at formindske risikoen for, at vinduerne åbnede. I dette forsøg benyttedes kun trempel/top varmesystemet.

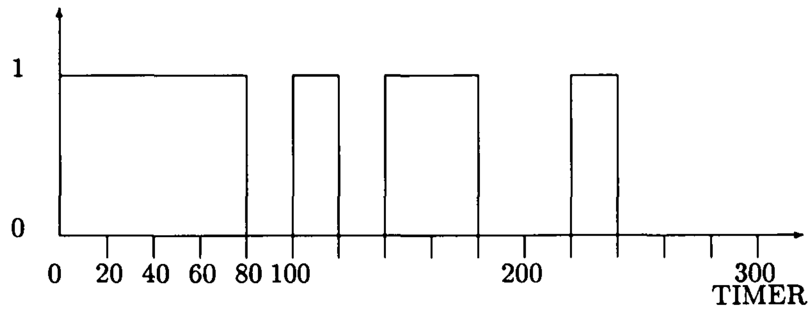
Energitilførslen styres efter det såkaldte PRBS-princip (PRBS= pseudo random binary signal). PRBS er et deterministisk signal, som springer mellem to niveauer, f.eks. 0 og 1. I forsøget har styringen været udført ved at ændre den *ønskede* fremløbstemperatur.

Der har været tilstræbt en fremløbstemperatur på 80°C, når signalet var 1. Når signalet var 0, blev der tilstræbt et varme-input på nul. Dette var ikke muligt at realisere eksakt, idet det ville kræve mulighed for momentant at fylde varmerørene med vand af rumtemperatur. I forsøget lukkedes ventilerne blot, når PRBS signalet skiftede til 0-niveau. Dette sker rent teknisk ved at foreskrive reguleringsudstyret en fremløbstemperatur på 5 °C.

Signalet kan kun skifte niveau ved tidspunkterne t=0,T,2T,...., hvor T er det korteste tidsinterval, hvori signalet er konstant. Da signalet er deterministisk, kan det fastlægges før forsøget påbegyndes. Det anvendte PRBS-signal er baseret på maximum-længde sekvenser (m-sekvenser), og i dette tilfælde bestemmes signalet ved at vælge det korteste tidsinterval, T, og det længste tidsinterval, nT, hvori signalet er konstant. Figur 6.1 viser et eksempel, hvor n=4 og T=20 timer. Ofte benævnes n " signalets orden". Signalet er periodisk med periode $T(2^n - 1)$, i dette tilfælde altså 15 T = 300 timer.

En af de væsentlige fordele ved PRBS er, at bortset fra periodiciteten udviser signalet en autokorrelation, som er tæt på autokorrelationen for hvid støj. Desuden vil signalet være ukorreleret med andre påvirkninger, som f.eks. udetemperatur og solstråling. Se iøvrigt [Godfrey, 1980] for en nærmere omtale.

I forsøget er benyttet et PRBS med T=20 min. og n=6. Dette giver en periodelængde på 21 timer og det længste tidsrum, hvori signalet er konstant, er 2 timer.



Figur 6.1: PRBS-signal med n=4 og T=20 timer

6.1.3 Registrering

Registreringsperioder

Fra det første forsøg opsamledes data i perioden fra 24. marts til 12. april. Opsamlingen fra det andet forsøg var planlagt til at skulle bestå af en indsvingningsperiode på 5 gange 21 timer og en egentlig forsøgsperiode på 8 gange 21 timer. På grund af forskellige omstændigheder (strømsvigt, lynnedslag og meget høje udetemperaturer) anvendtes data fra følgende perioder:

1. 18 maj - 22 maj 89
2. 25 maj - 27 maj 89
3. 31 maj - 12 juni 89

Registreringsmetoder

Data er opsamlet hver andet minut på to forskellige systemer. Nogle variable er registret på Havebrugscentrets PDP 11/34 anlæg, mens andre er registreret på en IBM-PC med programmel fra DGT. Enkelte variable er registreret på begge systemer. En IBM-PC med programmel fra DGT har i begge forsøg varetaget styringen af energitilførslen efter de respektive forsøgsplaner.

Registrerede variable

I begge forsøgsperioder er der hvert andet minut registreret data for beskrivelse af udendørsklima, energitilførsel, temperatur og lysforhold i huset, samt status for gardin og vinduespositioner. I tabel 6.1, side 93, er de registrerede variable listet sammen med oplysning om det benyttede måle- og registreringsudstyr i de to forsøg. Der er blandt andet målt:

- Udetemperaturen er målt med en Pt100 termoføler placeret ca 1.5 m over rygningen af et væksthus (afskærmet mod sol).

- Global stråling er registreret med to Kipp & Zonen solarimetre. I første periode benyttedes et solarimeter placeret ca. 1.5 m over rygningen af et væksthus. I anden periode benyttedes et solarimeter placeret på rygningen af et andet væksthus. Det to solarimetre var kalibrerede mod hinanden.

- Nedbøren registreredes med en Rainomatic måler, der via en tragt opsamler vandet i en lille beholder. Ved en given mængde afgives et signal til DGT-klimacomputeren. I denne sammenhæng er regn kun registreret som 0/1 variabel.

- Vindhastigheden er registreret ca 1.5 m over rygningen af et væksthus. Denne placering er dog uheldig, da luftbevægelserne her ændres af de skrå tagflader, hvilket kan give systematisk fejl i målingen af vindhastigheden.

- Lysintensitet er registreret med en fotocelle placeret på rygningen af et væksthus.

- Gardin- og vinduesbevægelserne er registreret både på en PDP 11/34 og på en IBM-PC. På IBM-PC'en med DGT-udstyr er dette registreret som en procent af maximal åbningsgrad. På PDP 11/34 er der kun registreret, om vinduerne har været helt lukkede henholdsvis gardinerne trukket helt fra.

Den indbyrdes placering af instrumenterne fremgår af figur 6.2 på side 94. For en nærmere beskrivelse af det øvrige måleudstyr henvises til [Amsen og Frøsig, 1985].

Variabel	Måleudstyr	Registreringsudstyr			
		Forsøg 1 marts-april 89		Forsøg 2 maj-juni 89	
		PDP	DGT	PDP	DGT
Lokale meteorologiske variable					
Udetemperatur, °C	Pt100		x	x	x
Globalstråling, W/m^2	Kipp & Zonen		(x)	x	
Vindhastighed, m/s	kopanemometer		x		x
Nedbør, 0/1	Rainomatic		x		x
Lysintensitet, Lux	Fotocelle		x		x
Væksthus variable					
Fremløbstemperatur, °C	Pt100			x	
Returtemperatur, °C	Pt100			x	
Energiforbrug, Calorier	Pt100+Flowmeter	x		x	
Temperaturkrav, °C	Beregnet		x		x
Rumtemperatur, °C	Aspireret Pt100		x	x	x
Vådtemperatur, °C	Aspireret Pt100		x	x	x
Pottetemperatur, °C	Pt100			x	
Bladtemperatur, °C	Infrarød føler			x	
Globalstråling, W/m^2	Roterende K & Z			x	
Vinduesåbning luvside, %	Positionsberegning		x		x
Vinduesåbning læside, %	Positionsberegning		x		x
Vinduesåbning, 0/1	Micro switch			x	
Gardinposition, 0/1	Micro switch			x	
Gardinposition, %	Positionsberegning		x		x

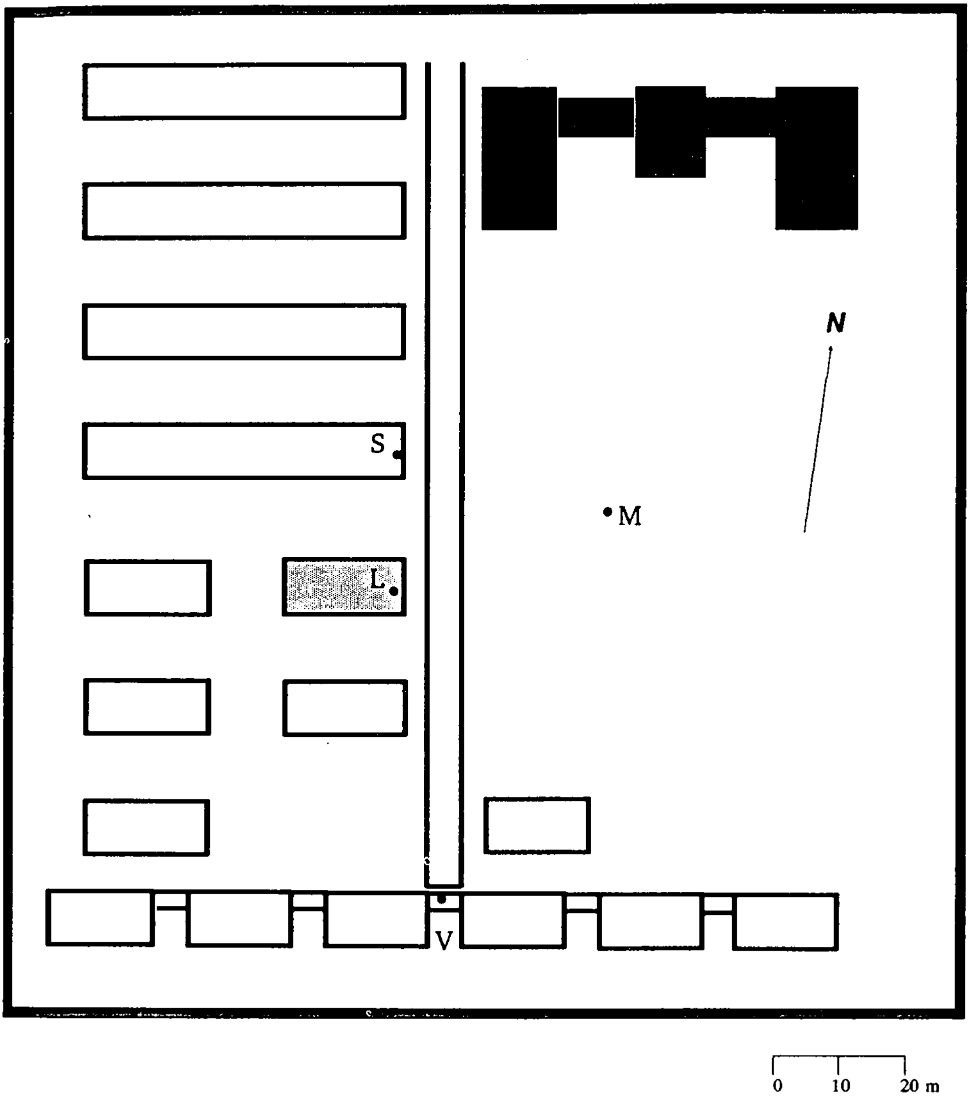
Tabel 6.1: Registrerede variable

6.2 Anvendte Data

Varmeanlægget har i forsøgsperioden, i gennemsnit, ydet 12000 Watt, hvilket giver omkring 70 Watt pr. m^2 grundareal. Til sammenligning lå effekten af indstrålingen i den pågældende periode mellem 0 og 800 Watt pr. m^2 med et gennemsnit på 110 Watt pr. m^2. Da gardinerne var trukket 80% for under hele forsøget, var det "effektive" areal af væksthuset en del mindre end det sande areal, således at de to energi-input, i gennemsnit, har været af omtrent samme størrelse.

I det følgende skal kort redegøres for, hvilke af de i tabel 6.1 anførte registrede variable, der indgik i selve beregningerne.

Som anført i ligning (4.64) og (4.66) side 62, optræder der to temperaturer i de omtalte tilstandsmodeller, temperaturen af indeluften, T_i, og temperaturen af det (delvis idealiserede) varmeakkumulerende lag, T_m. Af disse to er det i det foreliggende



Signaturforklaring:

: Kontorer m.v.

: Væksthuse

: Væksthus benyttet ved beregning af varmedynamik

V : Vejrstation med 1) Vindhastighedsmåler (DGT) 2) Solarimeter 3) Nedbørsmåler

S : Solarimeter registreret på PDP/11/34

L : Lysmåler regristreret på DGT

M: DMI's målestation

Figur 6.2: Skitse af væksthuse og målesteder forsøg kun T_i, der er registreret.

Indetemperaturen må formodes, for hovedparten, at være drevet af *solstråling, varmesystem* og *udetemperatur*. Derudover har *nedbør* og *vind* erfaringsmæsigt en vis betydning (der under normale forhold viser sig ved øget belastning af varmesystemet). Imidlertid var der i forsøgsperioden ikke større mængder nedbør eller vind, og disse faktorer har ikke været inddraget i beregningerne.

En meget vigtig variabel er vinduesåbning. I det øjeblik indetemperaturen nåede op over 35°C var reguleringsudstyret, som omtalt i afsnit 6.1.2, sat til at foretage ventilation (af hensyn til planterne). Denne ventilation hidfører et meget alvorligt problem for estimationen af parametre i de betragtede modeller, idet disse ikke tager højde for det komplicerede luftskifte, og den dertil hørende varmestrøm. Da det i forsøgs-perioden var usædvanligt varmt, var den relativt høje 35°C-grænse ikke nok til at forhindre kraftig ventilation i middagstimerne de fleste forsøgs-dage.

Resultatet heraf blev, at estimationerne baseredes på 4 døgns observationer, løbende fra midt på dagen den 3.juli til midt på dagen den 7.juli.

Vedrørende de i estimationerne anvendte variable skal følgende bemærkes:

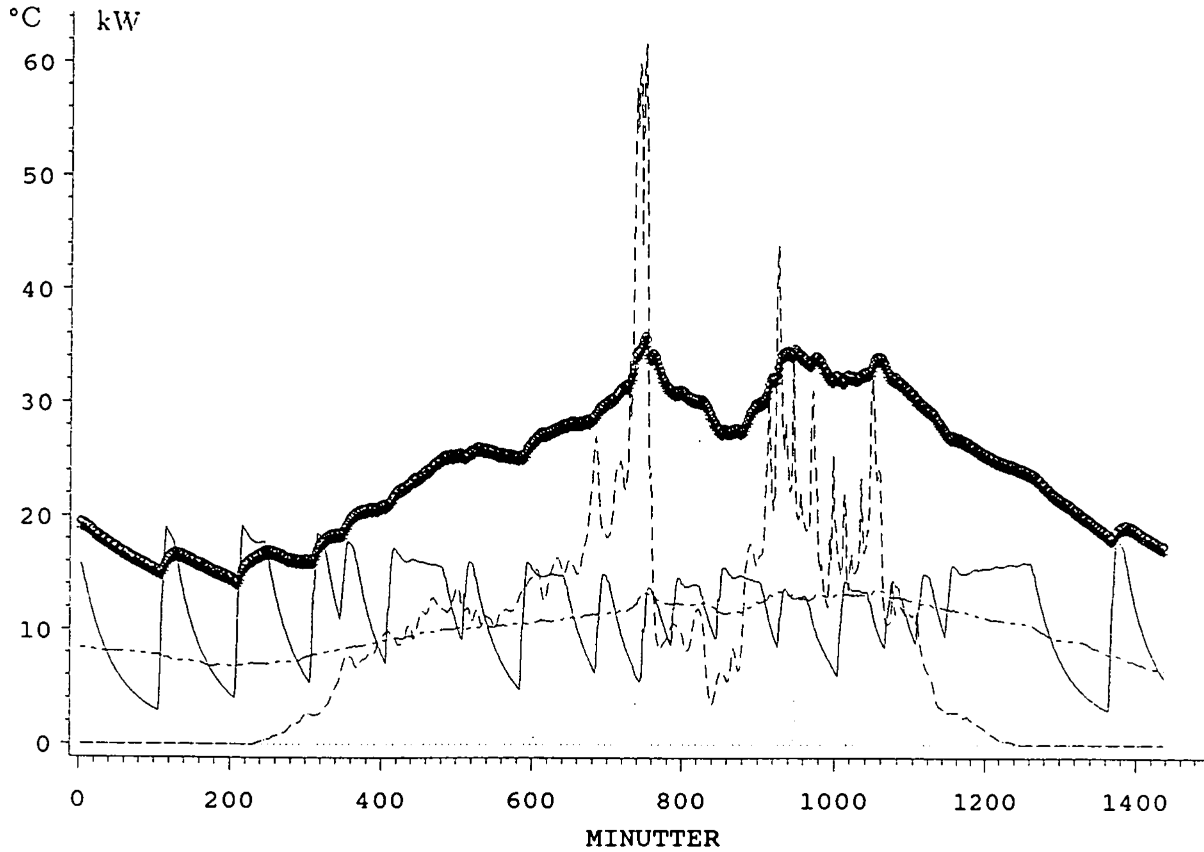
- globalstråling registreredes dels udendørs og dels inde i væksthuset med et roterende solarimeter. En optegning af den registrede stråling på en af de helt skyfrie dage i forsøgsperioden viste som ventet en næsten sinus formet kurve for den udendørs stråling, medens den indendørs stråling, ifølge solarimetret, udviste meget kraftig variation. Denne variation kan næppe afspejle den modtagne energi for væksthuset, men skyldes snarere særlige skygge effekter i forbindelse med gardinerne. Derfor er den udendørs stråling taget som mål for den indkommende energi.

- energi tilførelsen via varmesystemet blev, som omtalt i afsnit 6.1, styret af et PRBS-signal. Det betyder, at *belastningen* på varmesystemet i det store og hele fulgte det foreskreve 0-1 mønster. I tabel 6.1 er denne størrelse angivet som "Energiforbrug". Imidlertid fungerer varmerørene som en "buffer", der afgiver varme et godt stykke tid efter, at der er slukket for varmen. Det er denne reelle varmeafgivelse snarere end det foreskrevne PRBS-signal, der skal tages højde for i beregningerne. For at få et simpelt regneudtryk for denne størrelse, anvendes Newton's afkølingslov som en approksimation til det virkelige forløb. Dette er muligt at gøre, idet rørtemperaturen T_r kan sættes til gennemsnittet af frem- og tilbageløbstemperaturen, der begge registreredes. Man har så følgende udtryk for varme afgivelsen PR:

$$PR = \alpha \cdot (T_r - T_i) \tag{6.1}$$

Konstanten α kan findes ved at bruge, at den samlede varmeafgivelse

skal være det samme, hvad enten den udregnes v.h.a. udtrykket (6.1) eller v.h.a. det registrerede energiforbrug. Man finder så, at $\alpha \approx 280$ Watt/ °C. Det



Variabel	Enhed	Signatur
Rumtemperatur	°C	
Udetemperatur	°C	
Beregnet varmetilførsel	kW	
Beregnet solindstråling	kW	
Vindues funktion	0=lukket, 4=åben	

Figur 6.3: Plot af rumtemperatur, udetemperatur, beregnet indstråling og beregnet varmetilførsel. 4.Juli 1989

er PR_t, der indgår i de følgende beregninger, og som er afbilledet i figur 6.3. De tre "energi-input": PRBS-signal, registreret energiforbrug og det "reelle" energi-input PR er afbilledet i figur 6.4 (det drejer sig om de første 250 minutter af beregnings perioden).

På figur 6.3 er optegnet de tre vigtigste "input-variable" sammen med "respons-variablen", indetemperaturen, den 4.juli 1989. Ialt viser figuren 1440 minutter svarende til 720 observationer. Varmetilførslen er beregnet som ovenfor anført, indstrålingen er korrigeret for reflektion mm., ved at benytte det effektive areal. Ventilationen er også anført, og det ses, at der kun ventileres kort tid midt på dagen.

6.3 Estimation i diskret tid

I dette afsnit anføres resultaterne ved anvendelsen af *transferfunktions modeller* (se afsnit 4.2.4) til at beskrive de data, der er omtalt i afsnit 6.2. Hovedparten af de i dette afsnit omtalte estimationer er foretaget med SAS-systemets PROC ARIMA procedure [SAS/ETS, 1988].

Det drejer sig altså om modeller af formen:

$$T_t = \mu + \sum_i v_i(B)U_{i,t} + \frac{\Theta(B)}{\Phi(B)} \cdot \epsilon_t \qquad (6.2)$$

Her er

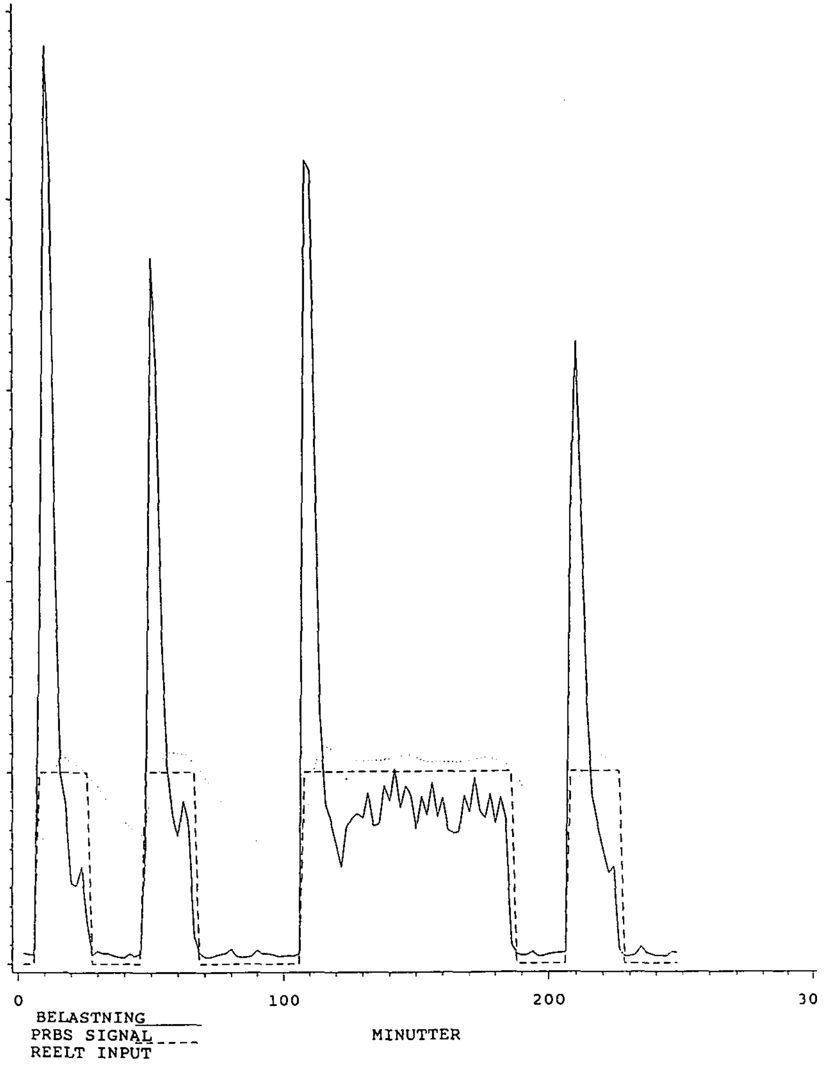
- T_t rumtemperaturen i væksthuset til tid t.
- B er forskydnings-operatoren fra afsnit 4.2.
- $v_i(B)$ er transfer-funktionen hørende til det i'te input $U_{i,t}$
- $\frac{\Theta(B)}{\Phi(B)} \cdot \epsilon_t$ er støjdelen af processen, og det antages altså, at støjen er en ARMA(p,q)-proces.

Som relevante input er anvendt i første omgang to variable:

1. Solstråling I_t.
2. Varmeafgivelse PR_t (PRBS-signal)

At dette er de vigtigste input fremgår relativt tydeligt af figur 6.3.

Autokorrelations-funktionen for både T_t og I_t viser meget kraftig autokorrelation i mange lag, et typisk tegn på *instationaritet*. Ved at se på krydskorrelationen mellem den reelle varmeafgivelse PR_t (som omtalt i afsnit 6.2) og globalstrålingen I_t opdages en kraftig krydskorrelation (hvad man godt kunne mistænke på forhånd, jvf. udtrykket (6.1), hvor T_t, og dermed indirekte I_t indgår. Disse to forhold bør allerede



Figur 6.4: Tre forskellige energiforbrug. Belastningen angiver varmeanlæggets energiafgivelse til væksthuset. Det reelle energi input angiver varmefladernes energiafgivelse til resten af væksthuset. PRBS signalet angiver det teoretiske styresignal til ventilerne.

på forhånd gøre een forsigtig; som omtalt i afsnit 4.2.4 er der jo i disse modeller forudsat dels stationaritet, dels *uafhængighed* af input-variable. Dette sidste forhold er der ikke umiddelbart noget at gøre ved, medens stationaritet muligvis kan opnås ved differensning. Imidlertid er det vanskeligt at fortolke en differensning rent fysisk; som omtalt sidst i afsnit 4.5 leder tilstands-modellen jo til en transfer-funktion model uden differenser.

I den situation kan man så prøve alligevel at estimere parametre i en u-differenset model og dernæst sammenligne med de resultater man måtte få efter passende differenser. ***Kan man slippe afsted med at differense samtlige variable det samme antal gange bør man nemlig forvente, at transfer-funktionerne er nogenlunde ens*** (både transfer-funktion og differensning er jo lineære operationer).

6.3.1 Estimation af "fysisk" transfer-model

Foreløbig bestemmelse af transfer funktioner

En første forestilling om transfer-funktionernes form kan fås ved såkaldt "RIDGE-regression", beskrevet i f.eks [Conradsen, 1979]. Formelt svarer en transferfunktion jo til regressions-koefficienterne i en regression af T_t på *alle* (i princippet uendeligt mange) laggede værdier af input-variablen. Forsøger man imidlertid at bestemme f.eks. de første 15 koefficienter i transfer-funktionen ved almindelig regression, får man let problemer med estimaterne, idet der er kraftig "co-linearitet" mellem de 15 vektorer af regressorerne (der altså hver indeholder ligeså mange pladser, som der er observationer, når vi ser bort fra "rand-effekter").

Ridge-regressionen erstatter de centrale estimater for parametrene med ikke-centrale estimater, der til gengæld har mindre varians, og man får mere pålidelige estimater på denne måde.

Ved at betragte koefficient-forløbet med voksende lag, kan man få en vis ide om transfer-funktionens udseende, se nærmere i afsnit 4.2.4. I det foreliggende tilfælde er der tale om to transfer-funktioner, én for hvert input.

- Ridge-regression af T_t på PR_t:

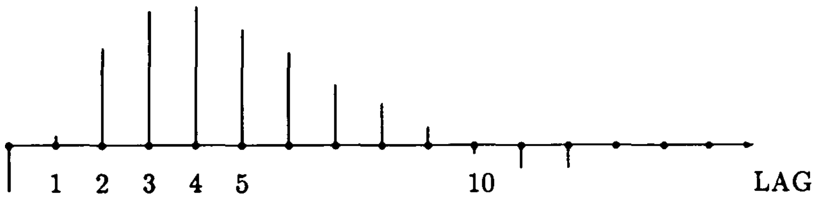
  der udvalgtes en natsekvens på 400 observationer, svarende til omkring 13 timer, hvor solstrålingen I_t ikke spillede nogen rolle. Et kvalitativt billede af koefficienternes forløb op til 15 lag er vist i figur 6.5.

  Det er her koefficienternes relative størrelser, der er af interesse.

  Den vigtigste information i dette billede ligger i den tydelige forsinkelse af responset. Der ser ud til at være fra 2-4 minutters forsinkelse (svarende til 1-2 observations-intervaller). Det ser også ud til, at man i transferfunktionen får brug for mindst førstegrads udtryk i tæller og nævner.

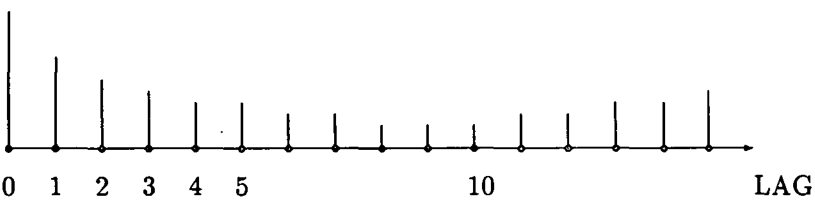
- Ridge-regression af T_t på I_t:

  der udvalgtes to dag-sekvens på 350 observationer, hver svarende til omkring 12 timer, hvor sol-strålingen I_t spillede en stærk rolle (den ene sekvens udgør



Figur 6.5: Impulsrespons-koefficienter for $PR_t \longrightarrow T_t$

den midterste del af det tidsrum , der er afbilledet i figur 6.3). Et kvalitativt billede af koefficienternes forløb op til 15 lag er vist i figur 6.6.



Figur 6.6: Impulsrespons-koefficienter for $I_t \longrightarrow T_t$

Den vigtigste information i dette billede ligger i den øjeblikkelige respons. Der ser ikke ud til at være nogen forsinkelse. Derimod skal man være forsigtig med at lægge for meget i funktionens form. Prøver man f.eks. at estimere regressions-koefficienter hørende til 20 lag istedet for 15, vil man finde det samme forløb i hovedtræk, men det minimum man finder omkring lag 9 vil så forskyde sig til lag 13-14. Dette antyder en instabilitet i estimationen, af en eller anden art, der kan stamme fra en så høj grad af "co-linearitet", at Ridge-teknikken ikke kan fjerne den.

Nedenfor angives en anden vej til foreløbig bestemmelse af overførings funktionen.

Med det angivne første kvalitative billede af transfer funktionen $PR_t \longrightarrow T_t$ prøver man nu på at "fitte" forskellige former med få parametre, på den omtalte natsekvens. Det viser sig hurtigt, at støjen skal med, hvis estimaterne skal konvergere. Det viser sig efter flere forsøg, at følgende udtryk giver en god beskrivelse af T_t's variation:

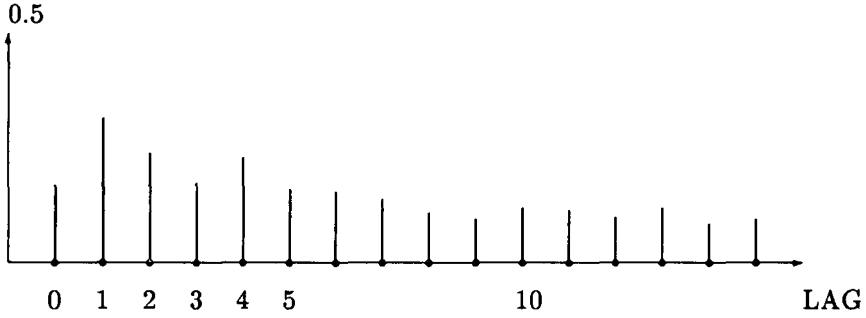
$$T_t = \mu + \frac{\omega_0 + \omega_1 B}{1 + \delta_1 B + \delta_2 B^2 + \delta_3 B^3} \cdot B \cdot PR_t + \frac{1 - \theta_1 B}{1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2} \cdot \epsilon_t$$

For at få et andet forslag til overføringen $I_t \longrightarrow T_t$ end det ovenfor nævnte, kunne man prøve at "differense" I_t og T_t i håb om at få stationære serier med nogenlunde samme transferfunktion. Er det dernæst muligt at finde en god ARMA-model for I_t kan man, efter "prewhitening", bruge *krydskorrelationen* som et "estimat" for transferfunktionen (se afsnit 4.2.4 og [Madsen, 1989]).

I dette tilfælde viser det sig, at det er muligt, for den sidste halvdel af dataserien (1350 observationer), at beskrive ∇I_t hæderligt (residualerne passerer autokorrelationstest for hvid støj op til lag 9 på 5 % niveau) ved følgende ARMA-proces:

$$\nabla I_t = \frac{1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2}{1 - \phi_8 B^8 - \phi_9 B^9 - \phi_{17} B^{17}} \cdot \epsilon_t$$

Efter filtrering får man en krydskorrelation som vist i figur 6.7.



Figur 6.7: Krydskorrelation mellem ∇T_t og ∇I_t efter filtrering.

Der ser stadig ikke ud til at være nogen forsinkelse, og formen af halen kunne tyde på, at et andengrads led i overføringsfunktionen's nævner ville være nødvendig.

Man går nu tilbage til de ikke-differensede serier og prøver, i overensstemmelse med resultaterne i afsnit 4.5, side 68, at tilpasse modeller, hvor nævnerne i de to overføringsfunktioner har samme "grad". I dette tilfælde leder betragtningerne i afsnit 4.5, sammenholdt med det just nævnte, til at betragte overføringsfunktioner med 2 eller 3'ie grads polynomier i nævneren.

Endelig model

- For at fastlægge den bedste værdi af forsinkelsen i overføringsfunktionen $PR_t \longrightarrow T_t$ prøves en række modeller med henholdsvis et eller to lag. *Det* *viser sig, at* **et** *lag er det bedste valg af forsinkelsen*, idet man får en bedre beskrivelse af variationen med det samme antal parametre. Bemærk iøvrigt, at en "to-lag-forsinkelse"'s model kan opfattes som en speciel form for "et-lag-forsinkelse"'s model (konstantled i tælleren er 0), medens det omvendte ikke er tilfældet.

- Tredje grads modellerne giver den bedste beskrivelse af T_t:

$$T_t = \mu + \frac{\omega_0 + \omega_1 B}{1 + \delta_1 B + \delta_2 B^2 + \delta_3 B^3} \cdot B \cdot PR_t + \frac{\tilde{\omega_0} + \tilde{\omega_1} B}{1 + \tilde{\delta_1} B + \tilde{\delta_2} B^2 + \tilde{\delta_3} B^3} I_t + \frac{1 - \theta_1 B}{1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2} \cdot \epsilon_t \quad (6.3)$$

Der estimeres på 2699 observationer. Den empiriske spredning på T_i er $\sigma(T_i) = 5.13$.

De estimerede parametre er opført i tabel 6.2. For nemheds skyld er alle parametre angivet uden "estimat-$\widehat{hat}$".

μ	20.5
ω_0	$4.0 \cdot 10^{-4}$ °C/W
ω_1	$5.0 \cdot 10^{-4}$ °C/W
δ_1	-1.413
δ_2	1.117
δ_3	-0.547
$\tilde{\omega_0}$	$8.8 \cdot 10^{-4}$ °C/$W \cdot m^2$
$\tilde{\omega_1}$	$21.8 \cdot 10^{-4}$ °C/$W \cdot m^2$
$\tilde{\delta_1}$	-0.476
$\tilde{\delta_2}$	-0.053
$\tilde{\delta_3}$	-0.306
θ_1	0.783
ϕ_1	1.9346
ϕ_2	-1.9348
σ_T	5.13
σ_ϵ	0.092

Tabel 6.2: Estimerede parametre

Der kan nu gøres følgende iagttagelser:

1. Her bemærkes først, at den ene rod i det autoregressive andengrads-polynomium (støjen) ligger ganske tæt ved 1, hvilket skyldes den langstrakte autokorrelation af T_t (som nok i realiteten er udtryk for instationaritet). ***Rødderne er,***

med fire decimaler, 0.9963 og 0.9384. Dette svarer i en anden ordens model til tidskonstanter på ca. 1/2 og 9 timer (se afsnit 4.5). Der bør dog ikke lægges for meget i disse størrelser, b.l.a. fordi den estimerede model jo er en tredie ordens model.

2. Hvis denne model estimeres på den første, henholdsvis sidste, del af den fulde estimations-serie vil man opdage, at tredje grads polynomiet i nævneren for transferfunktionen $PR_t \longrightarrow T_t$ er stabil i den forstand, at polynomiets rødder ikke er meget forskellige i de tre tilfælde. Dette er derimod ikke tilfældet for transferfunktionen $I_t \longrightarrow T_t$, der tydeligt ændrer rødder ved overgang fra én observations-serie til en anden.

3. Som beskrevet i afsnit 4.5 forventes udfra den fysiske model , at der er tidskonstanter i transfer funktionernes nævnere. Som lige omtalt er det funktionen $PR_t \longrightarrow T_t$, der synes at have et "stabilt" nævner polynomium. Som det fremgår af tabellen drejer det sig, for den fulde serie (2699 observationer), om polynomiet (bemærk ved reference til afsnit 4.5, at den variable, z, i z-transformationen svarer til $z = B^{-1}$):

$$1 - 1.413 \cdot B + 1.117 \cdot B^2 - 0.547 \cdot B^3$$

Vi er interesserede i de inverse rødder d.v.s. rødderne i

$$z^3 - 1.413 \cdot z^2 + 1.117 \cdot z - 0.547$$

Denne ligning har en reel rod $\alpha \approx 0.855$ *samt et par komplekst konjungerede rødder af længde* ≈ 0.8. Ifølge ligning (4.118), side 70, svarer den reelle rod til tidskonstanten

$$\tau_1 = \frac{1}{\ln\frac{1}{\alpha}} \; tidsenheder$$

Men her er tidsenheden=samplingstiden=2 minutter, således at vi får

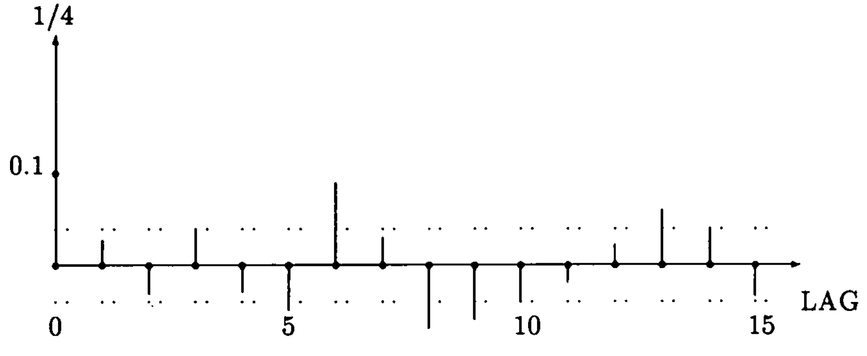
$$\tau_1 \approx \frac{1}{\ln\frac{1}{0.855}} \cdot 2 \; minutter$$

hvilket giver $\underline{\tau_1 \approx 12,8 \text{ minutter}}$.

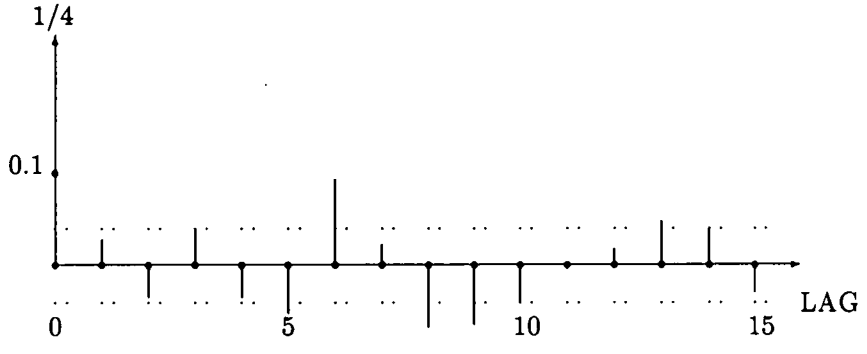
De to øvrige rødder svarer til en dæmpet svingning med tidskonstant omkring 9 minutter og periode omkring 10 minutter.

Denne svingning skal man være varsom med at fortolke som en egenskab ved det dynamiske system alene. Det er tænkeligt, at den er nøje knyttet til PRBS-signalets 20-minutters grundperiode, der ifølge det just anførte ser ud til at ligge i nærheden af den tidskonstant, der hører til væksthusets "korttids-dynamik". Det er således ikke nødvendigvis en tredie-ordens fysisk model, der ligger bag den her omtalte tredie-ordens transferfunktion-model.

4. I figurerne (6.8) og (6.9) er vist autokorrelation og partiel autokorrelation for modellens *residualer*. 2σ-grænsen (altså $\approx$ 95% konfidens-grænse) er ifølge udtrykket 4.45 omkring $2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2699}} \approx 0.04$ og er indtegnet på tegningerne. Som man ser er residualerne *ikke* hvid støj, men autokorrelationen minder meget om den partielle autokorrelation, hvilket kan være et tegn på, at modellen ikke kan forbedres væsentligt inden for sin klasse (af lineære modeller).



Figur 6.8: Autokorrelation af residualer



Figur 6.9: Partiel autokorrelation af residualer

6.3.2 Estimation af beslægtede modeller

Der er to problemer (mindst) med den model, der er undersøgt i forrige afsnit.

Afhængighed De to input serier PR_t og I_t er *ikke* uafhængige af hinanden (hvilket er en teoretisk forudsætning for gyldigheden af estimations-procedurerne). Det *teoretiske* PRBS-signal er ukorreleret med I_t, men PR_t er defineret i ligning 6.1 (side 95), hvoraf det fremgår, at T_i, og derigennem I_t, indgår i definitionen af PR_t.

Instationaritet Der er ingen tvivl om, at det er vanskeligt at opfatte de indgående tidsrækker som stationære, hvilket strengt taget er en forudsætning for de angivne estimationer af parametre.

Dette kan man nu prøve at råde bod på af forskellige vej.

- Som omtalt sidst i afsnit 6.3 kan man tage transfer-delen af den foregående model og differense input og output, og må så forvente at få en model hvis transfer-del (i teorien) er magen til, medens støjdelen må forventes at få et andet udseende. Man finder følgende model:

$$\nabla T_t = \mu + \frac{\omega_0 + \omega_1 B}{1 + \delta_1 B + \delta_2 B^2 + \delta_3 B^3} \cdot B \cdot \nabla PR_t$$
$$+ \frac{\tilde{\omega_0} + \tilde{\omega_1} B}{1 + \tilde{\delta_1} B + \tilde{\delta_2} B^2 + \tilde{\delta_3} B^3} \nabla I_t + \frac{1 - \theta_1 B}{1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_6 B^6} \cdot \epsilon_t \tag{6.4}$$

  I dette tilfælde er den empiriske spredning på ∇T_t

$$\sigma(\nabla T_t) = 0.156$$

  og

$$\hat{\sigma}_\epsilon = 0.095$$

  Den relative reduktion af variansen er selvfølgelig langt mindre, idet differensningen i sig selv reducere variansen voldsomt. Det viser sig nu, at man får essensielt de samme resultater i dette tilfælde. Estimatet for tidskonstanten bliver her lidt mindre, idet den reelle rod i tredjegradspolynomiet (hørende til input PR_t) bliver $\alpha \approx 0.814$, svarende til lidt under 10 minutter. Det er dog heller ikke muligt her at reducere residualerne til hvid støj. Iøvrigt viser parametren $\tilde{\delta_3}$ sig at være nær nul, T-test størrelen ligger på 0.95 . Dette vil vi udnytte om lidt.

- En anden mulighed er at benytte en korrigeret udgave af output T_t. Man kan forestille sig, at *udetemperaturen* i det store og hele angiver *trenden* i indetemperaturen, og at denne trend kan fjernes ved simpelthen at subtrahere udetemperaturen fra T. I dette tilfælde er den empiriske spredning på $(T_t^{inde} - T_t^{ude})$

$$\sigma(T_t^{inde} - T_t^{ude}) = 3.27$$

  og

$$\hat{\sigma}_\epsilon = 0.112$$

  Iøvrigt giver dette ikke nogen forbedring eller væsentlig forandring i forhold til hovedmodellen.

- Man kan prøve at inddrage udetemperaturen som input. Dette leder imidlertid ikke til nogen forbedring, idet det viser sig umuligt at finde en fornuftig transferfunktion.

- Hvis man opgiver den umiddelbare overførsel af den kontinuerte fysiske model til tranferfunktion form, kan man eksperimentere med flere muligheder (som så til gengæld ikke kan deduceres ud fra fysikken). Dette leder os til

Thema con variatione

Det har i alle ovennævnte modeller været et gennemgående tema, at tredjegrads nævneren i transferfunktionen for strålingen, I_t, var stærkt følsom overfor både variationer i støj-ledet og ændring af observationes-serien (første halvdel, sidste halvdel og den fulde tidsrække (2699 observationer) har været anvendt), medens det omvendte gjorde sig gældende for PR_t. Man kan derfor prøve en model med mindre orden for input I_t's vedkommende. Det viser sig, at en differenset model af følgende form giver et godt "fit":

$$\nabla T_t = \mu + \frac{\omega_0 + \omega_1 B}{1 + \delta_1 B + \delta_2 B^2 + \delta_3 B^3} \cdot B \cdot \nabla PR_t$$
$$+ \frac{\tilde{\omega_0} + \tilde{\omega_2} B}{1 + \tilde{\delta_1} B + \tilde{\delta_2} B^2} \nabla I_t + \frac{1 - \theta_1 B}{1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3} \cdot \epsilon_t \tag{6.5}$$

Den empiriske spredning af T_i er $\sigma(T_i) = 0.156$. De estimerede parametre er opført i tabel 6.3. For nemheds skyld er alle parametre angivet uden "estimat-$\widehat{hat}$".

μ	$5.7 \cdot 10^{-4}$
ω_0	$4.4 \cdot 10^{-4}$ °C/W
ω_1	$5.4 \cdot 10^{-4}$ °C/W
δ_1	-1.306
δ_2	0.961
δ_3	-0.454
$\tilde{\omega_0}$	$1.16 \cdot 10^{-3}$ °C/Wm^2
$\tilde{\omega_2}$	$1.06 \cdot 10^{-3}$ °C/Wm^2
$\tilde{\delta_1}$	-1.66
$\tilde{\delta_2}$	0.676
θ_1	0.658
ϕ_1	0.881
ϕ_2	0.050
ϕ_3	0.103
σ_T	0.156
σ_ϵ	0.096

Tabel 6.3: Estimerede parametre

Ganske vist reduceres variansen ikke mere end i den ovenfor anførte "differencede" model, men man opnår her, at andengrads polynomiet bliver "stabilt" i ovennævnte forstand. De to relevante polynomier er:

$$z^3 - 1.306 \cdot z^2 + 0.961 \cdot z - 0.454$$

med rødderne 0.811 og det komplekst konjungerede par $0.248 \pm 0.706 \cdot i \approx 0.748 \cdot e^{\pm i70.7°}$
og

$$z^2 - 1.661 \cdot z - 0.676$$

med rødderne 0.947 og 0.714

- Den reelle rod i trediegradspolynomiet svarer til følgende tidskonstant:

$$\tau_1 \approx \frac{1}{\ln \frac{1}{0.811}} \cdot 2 \; minutter$$

hvilket giver $\underline{\tau_1 \approx 9.6 \text{ minutter}}$

Parret af komplekst konjungerede rødder svarer til en dæmpet svingning med tidskonstant 7 minutter og periode 10 minutter. Se kommentaren til hovedmodellen.

- De to rødder i andengradspolynomiet svarer til tidskonstanterne

$$\tau_1 \approx \frac{1}{\ln \frac{1}{0.714}} \cdot 2 \; minutter \approx \underline{6 \; minutter}$$

$$\tau_2 \approx \frac{1}{\ln \frac{1}{0.947}} \cdot 2 \; minutter \approx \underline{37 \; minutter}$$

Residualerne er stadig ikke hvid støj, men autokorrelationen og den partielle autokorrelation har stort set samme udseende som anført i diskussionen af hovedmodellen. Den lange tidskonstant har ved flere forskellige estimationer vist sig svær at bestemme.

Vi kan altså foreløbigt konstatere, at væksthuset er karakteriseret af en kort tidskonstant på omkring 10 minutter, og (mere forsigtigt) en større konstant af størrelsesorden en time.

6.4 Estimation i kontinuert tid

I dette afsnit anføres resultaterne af estimationen af de lineære stokastiske tilstandsmodeller i kontinuert tid. Estimationen er foretaget med selvudviklet programmel, [Lynnerup, 1989], idet der ikke er kendskab til eksisterende standard programmel.

I afsnit 4.1 er der foreslået modeller med både to og tre tidskonstanter. Det har hidtil ikke været muligt at estimere en model med tre tidskonstanter, hvilket muligvis må tilskrives det faktum at estimationen er en ikke triviel og meget ressourcekrævende opgave, eller at kvaliteten af de givne data ikke er fuldt tilfredsstillende.

En opskrivning af modellen med to tidskonstanter på matrixform giver følgende 2. ordens model for væksthusets varmedynamik

$$\begin{bmatrix} dT_m \\ dT_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_i c_m} & \frac{1}{r_i c_m} \\ \frac{1}{r_i c_i} & \frac{1}{c_i}(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_i}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_m \\ T_i \end{bmatrix} \times dt$$
$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r_a c_i} & \frac{A_e}{c_i} & \frac{1}{c_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_a \\ \phi_s \\ \phi_h \end{bmatrix} \times dt + \begin{bmatrix} dv_m \\ dv_i \end{bmatrix} \tag{6.6}$$

hvor w(t) er en Wiener-proces med tilvækstvariansen

$$R_1 = \begin{bmatrix} \sigma_{1,11}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{1,22}^2 \end{bmatrix} \tag{6.7}$$

Observationsligningen er tilsvarende givet ved:

$$Y_t = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_m \\ T_i \end{bmatrix} + e_t \tag{6.8}$$

hvor

$$V[e_t] = \sigma_2^2 \tag{6.9}$$

Som grundlag for estimationen er anvendt de samme observationer som beskrevet i afsnit 6.3. De estimerede parameterværdier (hat'erne er udeladt) findes i tabel 6.4.

r_i	0.302	°C/kW
c_i	1.047	kWh/°C
r_a	0.469	°C/kW
c_m	1.046	kWh/°C
A_e	67.33	m^2
$\sigma_{1,11}$	2.9	(°C)
$\sigma_{1,22}$	0.00001	(°C)
σ_2	0.055	(°C)

Tabel 6.4: Estimerede parametre for modellen (6.6)

Med parameterestimaterne indsat, fremkommer den estimerede tilstandsmodel

$$\begin{bmatrix} dT_m \\ dT_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.1624 & 3.1624 \\ 3.1592 & -5.1966 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_m \\ T_i \end{bmatrix} \times dt$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 2.0374 & 64.303 & 0.95501 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_a \\ \phi_s \\ \phi_h \end{bmatrix} \times dt + \begin{bmatrix} dv_m \\ dv_i \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Egenværdierne til transitionsmatricen i (6.10) er -0.8591 og -7.4999, hvilket betyder, at tidskonstanterne bliver henholdsvis 69.84 min. og 8.00 min.
De tilhørende egenvektorer bliver

$$v_1 = \begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.7283 \end{bmatrix} ; v_2 = \begin{bmatrix} -0.7291 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$$

Dette betyder, at variationer der følger den store tidskonstant forløber sådan at T_m og T_i er nogenlunde ens. Derimod vil variationer der beskrives ved den korte tidskonstant være karakteriseret ved en forskel mellem T_m og T_i.

6.4.1 Modelkontrol

For en undersøgelse af den estimerede models evne til at beskrive væksthusets varmedynamik benyttes metoder beskrevet i afnit 4.4. Det vil sige, at i tidsdomænet beregnes autokorrelationsfunktionerne, og i frekvensdomænet beregnes det kumulerede periodogram, på grundlag af de fundne ettrinsprediktionsfejl (residualer) for modellen.

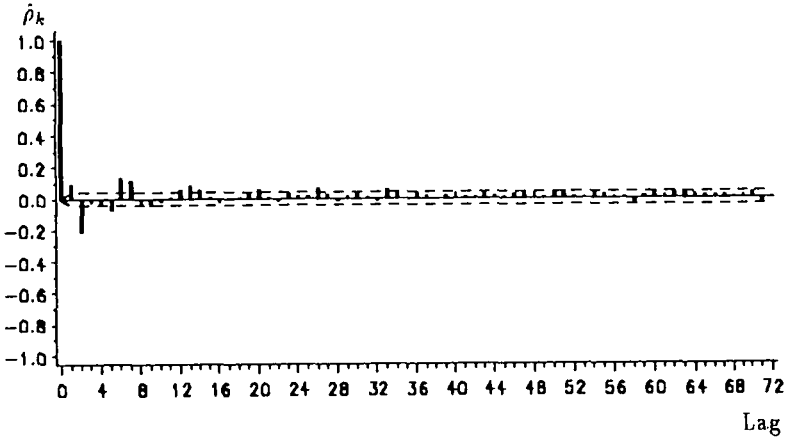
På figur 6.10 og 6.11 er vist henholdsvis autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion for residualerne til ettrinsprediktionen. På figur 6.12 er tilsvarende vist det kumulerede periodogram. I alle tilfælde er der indtegnet 95% konfidens grænser under en hypotese om hvid støj.

De estimerede autokorrelationsfunktioner indeholder en del værdier som ligger uden for 2σ-grænserne for små lag-værdier. Test baseret på autokorrelationerne viser, at der er systematiske variationer tilbage i residualerne, og man må således konkludere, at der er sammenhænge som modellen ikke har beskrevet. De signifikante værdier er dog meget små, og det vil derfor aldrig kunne opnåes nogen væsentlig bedre beskrivelse af dynamikken ved en udvidelse af modellen. Dette forhold må dog givetvis tilskrives datamaterialet, samt forsøgsplanen, som kun sigtede mod en beskrivelse af korttidsdynamikken. Det må således forventes at en forsøgsplan der sigter mere bredt - ved at påvirke systemet i begge ender af spektret for dynamikken - kan lede til en samtidig identifikation af den langsomme dynamik.

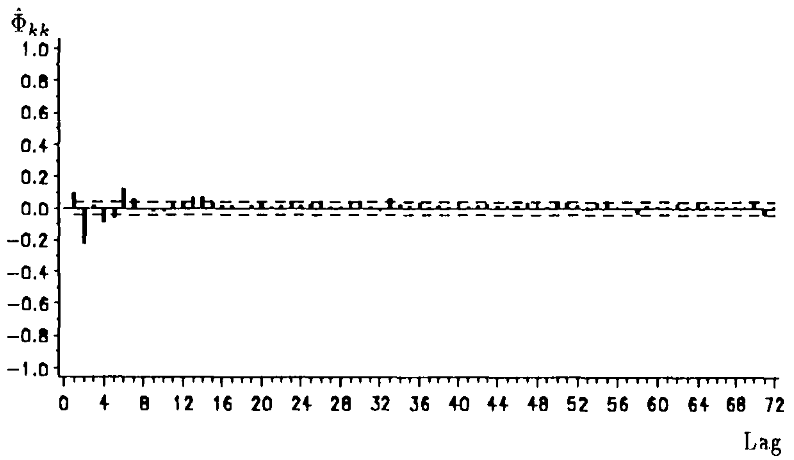
Det kumulerede periodogram understøtter ovennævnte; men viser samtidig, at det primært er i det højfrekvente område der findes en smule signifikant restvariation.

6.5 Diskussion

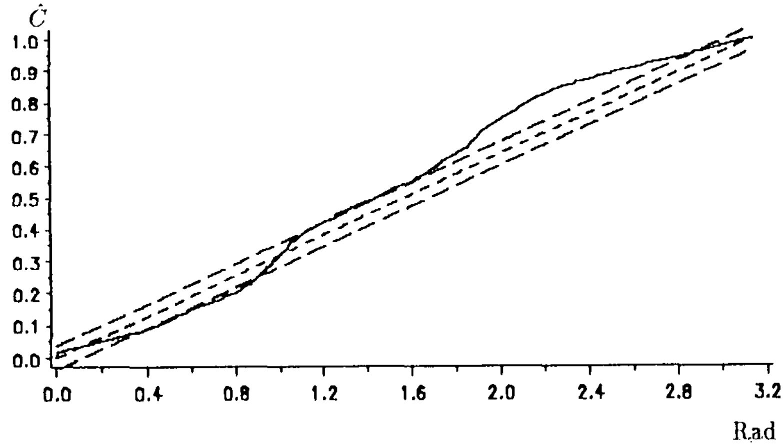
Nogle af de dynamisk bestemte parametre kan man også prøve at bestemme ved statiske overslagsbetragtninger. For at kunne foretage sammenligninger, vil det blive gjort herunder.



Figur 6.10: Estimeret autokorrelationsfunktion for residualer til indetemperaturen.



Figur 6.11: Estimeret partiel autokorrelationsfunktion for residualerne til indetemperaturen.



Figur 6.12: Estimeret normeret kumuleret periodogram for residualerne til indetemperaturen.

r_a er som bekendt modstanden for varmeoverførsel fra drivhuset til udeluften. Man har erfaret at varmetabet for et drivhus er af størrelsesorden 7 W pr. kvadratmeter overflade og pr. graders celsius. Idet den samlede overflade er af størrelsen 330 kvadratmeter når man, på grundlag af disse erfaringstal, frem til vurderingen r_a = 0.43°C/kW. Dette ligger meget tæt ved estimatet i tabel 6.4.

En vurdering af c_i viser at estimatet er ca. 4 gange større end varmekapaciteten af den tilsvarende mængde tør luft. Dette vurderes ikke at være urimeligt, idet luften dels ikke er tør og dels er det forventeligt, som omtalt i afsnit 4.1, at den yderste del af overfladerne skal henregnes til c_i. Under forsøget har der været ca. 4320 planter (*Nephrolepis exaltata*) med gennemsnitlig ca 200 g overjordisk masse pr. plante, hvoraf ca 87 % var vand, (personlig komm., Andersson, N.E., Årslev). Vandmængden heri har en varmekapacitet på ca 0.87 kWh/°C. Plantens vandmængde forventes at indgå enten i c_i eller i c_m. Estimat af $c_i + c_m$ på 2.09 kWh/°C svarer til varmekapacetiten den tørre luft, planternes vandindhold og ca. 0.5 cm vand fordelt over gulvet i hele væksthuset. I denne betragtning, er der ikke taget hensyn til at varme frigivet/bundet ved fortætning/fordampning måske indgår i c_i. Estimatet af c_m er meget svært at vurdere, idet der reelt er tale om et distribueret system, hvor estimatet af c_m til dels vil afhænge af de påtrykte variationer. Den betragtede model indeholder kun en tidskonstant til at beskrive det såkaldte varmekumulerende medium i væksthuset, og det må forventes at en bedre approximation af det distribuerede system i form af en model med flere tidskonstanter (se afsnit 4.1) vil give et lettere fortolkeligt estimat for c_m. Dette må henregnes til at være et af indsatsområderne for kommende experimenter. Endvidere har man ved valget af PRBS-signalet valgt at fokusere på den korte tidskonstant, med det resultat at større tidskonstanter bliver dårligere bestemt.

I tabel 6.4 er det effektive vinduesareal estimeret til 67 kvadratmeter. Afhængig af fordelingen mellem direkte og diffus stråling vil man forvente at udgangspunktet for en arealberegning ligger mellem gulvarealet plus skyggen og det totale glasareal. Det effektive areal fremkommer derefter ved at korrigere for reflektion, absorption og direkte gennemgang. Erfaringsmæssigt vil ca. 2/3 af strålingen komme ind i huset. Heraf går ca. 25% direkte til indeluften. En stor del af resten vil senere bidrage til en temperaturstigning gennem en afgivelse af varme ved fortætning. I vores tilfælde er forholdene yderligere kompliceret af at gardinerne, der på grund af forsøgstidspunktet var trukket 80% for. Forskellige vurdering baseret på ovennævnte oplysninger leder til, at det effektive vinduesareal ligger mellem ca. 30 m^2 og ca. 100 m^2. Man kan konstatere, at det estimerede areal ligger indenfor disse vurderinger.

6.5.1 De to estimationsmetoder.

Tidskonstanter, målestøj og effektivt areal er estimeret både ved brug af tilstandsligninger og ARIMA-modeller. I tabel 6.5 er disse sammendraget.

Parameter	Tilstandsligninger	ARIMA modeller
Kort tidskonstant, min.	8	6 - 13
Lang tidskonstant, min.	70	37
Effektivt areal, m^2	67	
Målestøj, °C	0.055	—
Samlet støj, °C	—	0.092-0.096

Tabel 6.5: Sammendrag af to estimationsmetoder

Med de to metoder estimeres den korte tidskonstant i begge metoder til omkring 10 min. Størrelsesorden af den korte tidskonstant må derfor med stor sikkerhed være ca. 10 min. for det benyttede hus — incl. planter, gardinposition m.m. Derimod er der en større forskel mellem de to metoders estimat for den lange tidskonstant.

Målestøjen er i begge metoder estimeret forholdsvis lavt. Ved begge metoder er estimatet mindre end registreringsnøjagtigheden.

Estimatet af måleusikkerheden $\hat{\sigma}_2 = 0.055°C$ forekommer ligeledes at være rimelig, idet de anvendte temperaturmålingerne kun kunne opgives med en decimal. Hvad angår procesvarianserne viser estimaterne, at det tilsyneladende er omkring det varmeakkumulerende medium at de største mangler i modellen forekommer, hvilket givetvis igen må tilskrives at modellen kun anvender en tilstand til en beskrivelse af det varmeakkumulerende medium i væksthuset, som reelt må antages at udgøre et distribueret system.

h_1	θ			
	10	20	25	50
0	7.20	7.20	7.20	7.20
0.5	9.75	8.43	8.16	7.58
1.0	12.30	9.67	9.13	7.96
1.5	14.86	10.91	10.10	8.33
2.0	17.41	12.15	11.06	8.71

Tabel 6.6: Den effektive bredde af væksthuset figur 6.13, som funktion af solhøjde, θ, og højde af det absorberende medie i væksthuset, h_1.

6.5.2 Tidskonstanter i andre bygninger.

I dette væksthus er der estimeret to tidskonstanter. En kort på ca. 10 min. og en lang på ca. en halv til en time.

Sammenlignet med andre bygninger er tidskonstanterne korte. Således estimeredes tidskonstanter i en lavenergibolig til henholdsvis ca. 25 min. og ca. 150 timer [Hansen et al., 1986].

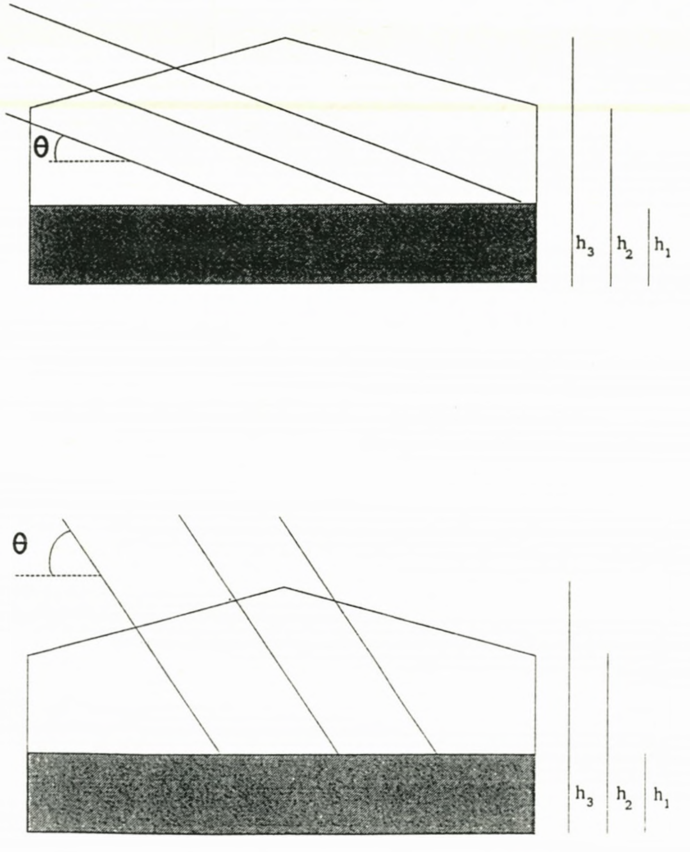
6.5.3 Vurdering af det effektive areal.

For at kunne vurdere størrelsen af det estimerede effektive areal kan man lave nogle simplificerede statiske betragtninger. Her er delt op på situationer med hhv. udelukkende direkte lys og udelukkende diffust lys. Her skal først behandles det direkte lys.

Følgende antagelser gøres

- der betragtes kun direkte sollys
- væksthuset ligger Øst-Vest og solen antages at stå direkte i Syd
- der betragtes kun et tværsnit af væksthuset, da længden er ligegyldig under de første to antagelser
- lysabsorption inde i væksthuset modelleres ved tilstedeværelsen af et enkelt sort legeme med en højde, der varieres

Da reflektionskoefficienter for almindeligt glas er temmelig ufølsommme overfor indfaldsvinklen sålænge den er under 60 grader, er der regnet med en konstant refleksion på 10%. Der regnes på et væksthus med trempelhøjde på 2m, totalhøjde på 4 m samt bredde på 8 m. For solhøjder, θ, på under 25 grader, bliver situationen da som vist på figur 6.13 a. I tabel 6.6 er vist hvordan den effektive bredde bliver som funktion af solhøjde og højde af det absorberende medie i væksthuset, h_1.



Figur 6.13: Illustration af indstrålingen på et væksthus med en solhøjde θ på a. under 25 ° b. over 25 °. Beregningsoverslagene er foretaget på et væksthus med dimensionerne: trempelhøjde 2m, totalhøjde 4m og bredde 8m.

Hvis solhøjden stiger væsenligt over 25 grader opstår der en anden situation som det er vist på figur 6.13 b. Med de samme antagelser som ovenfor bliver den effektive bredde for en solhøjde på 50 grader som angivet i tabel 6.6.

En vurdering af det estimerede effektive areal kan tage udgangspunkt i simplificerede statiske beregninger. Ved at benytte de geometriske mål for det aktuelle væksthus, og de forskellige indstrålingsforhold som er vist på figur 6.13, kan man finde et effektivt areal på mellem $81m^2$ og $210m^2$. Nedre grænse fås for en solhøjde på 50 grader og en fordampning på 50%, mens øvre grænse fås for en solhøjde på 10 grader og ingen fordampning. Begge tal ligger altså over det fundne estimerede areal.

Beregning af den del af indstrålingen, som omsættes til energi i væksthuset ved diffus stråling er mere kompliceret at beregne, end for den direkte indstråling.

Antages det, at glasfladens transmissions-, reflektions-, og absorptionskoefficient er ens for glassets inderside og yderside samt at kulturen er ensartet og har ensartet absorbtionskoefficient, kan husets effektive areal beregnes analogt til stråling mellem parallelle skærme [Amsen, 1977]:

$$A_w = n(1 - r_g - t_g^2 q \frac{1}{1 - r_g q}) p_s.$$

Her er n den vandrette flade, der modtager samme indstråling som husets glasflader, r_g er glasfladens reflektionskoefficient, t_g er glasfladens transmissionskoefficient, $q = 1 - \frac{172+29h}{n} e_a$ er den del af den indkomne stråling, der ikke absorberes af kulturen (d.v.s. reflekteres fra kulturen eller går gennem huset), e_a er kulturens absorbtionskoefficient, 172 er husets grundareal, 29 er husets halve omkreds, h er kulturens højde over soklen og p_s er den del af den absorberede energi, der medgår til opvarmning.

Den enkelte glasflades bidrag til n er her beregnet ved at multiplicere fladens areal med den del af himmelhvælvingen, der kan bestråle fladen. Denne del er beregnet numerisk [Hejndorf og Kristensen, 1977] til 250 m^2, hvis væksthuset antages at stå på en sort flade, og til 327 m^2, hvis væksthuset står på en hvid flade.

Med disse beregningsmetoder finder vi at husets effektive areal ligger mellem 46 m^2 og 175 m^2 ved diffus stråling, når der benyttes følgende forudsætninger: Kulturens absorbtionskoefficient ligger mellem 0.6 og 0.8, glassets absorbtionskoefficient ligger mellem 0.05 og 0.10, glassets transmissionskoefficient ligger mellem 0.50 og 0.80, kulturens højde over soklen er 0.5 m samt at den del af indstrålingen, der medgår til opvarmning ligger mellem 0.5 og 1.0. Beregning af den del af indstrålingen, som omsættes til energi i væksthuset ved diffus stråling er mere kompliceret at beregne.

6.5.4 Udvidelse af model med hensyn til latent varme.

I (4.17) og (4.18) har vi beskrevet husets varmedynamik ved en model med to tidskonstanter. Denne model tager ikke højde for at der er varierende luftfugtighed i væksthus og i udeluft. For væksthusluften betyder det, at varmekapaciteten kommer til at variere fordi varmefylden af luft er afhængig af luftfugtigheden, ligesom den iøvrigt også er afhængig af lufttemperaturen. Men denne variation er ikke særlig stor, selvom man lader både temperatur og luftfugtighed variere. Derimod har fordampning eller fortætning af vand stor betydning for energibalancerne. Den latente varme, som er den energi, der er bundet ved fordampning af vand, varierer altså.

Hvis vi definerer den latente varmekapacitet som den varmemængde, der frigives hvis luftens vandampindhold fortættes, kan vi udvide ovennævnte model til at tage højde for den latente varme

$$c_m \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{r_i}(T_i - T_m) \tag{6.11}$$

$$c_i \frac{dT_i}{dt} + \frac{dC_v}{dt} = \frac{1}{r_a}(T_a - T_i) + \frac{1}{r_i}(T_m - T_i) + \frac{1}{r_v}(C_a - C_v)V_a + \phi_s + \phi_h \tag{6.12}$$

Her er C_v den latente varmekapacitet af indeluften, og C_a er den latente varmekapacitet af "et tilsvarende volumen" (eller masse) udeluft. V_a er lufthastighed og r_v er en diffusionsmodstand. C_v, C_a og V_a kan måles eller beregnes direkte ud fra målte størrelser. Med de udførte registreringer er der dog ikke mulighed for at beregne C_a. Som det ses kan den indkomne stråling og opvarmning enten gå til at hæve temperaturen, eller til at hæve den latente varmekapacitet, altså fordampning af vand. Leddet der beskriver luftudveksling mellem inde- og udeluft har vindhastigheden indgående lineært. Det er en praktisk antagelse som formodes at have en rimelig gyldighed. Leddet på venstre side af (6.12) er den afledede af den indre energi af væksthuset. Hvis væksthuset havde været et lukket system, ville det have været den afledede af entalpien, idet $E = H - A$, hvor E er den indre energi, H er entalpien og A er det arbejde systemet udfører (aktuelt luftudvidelse i forbindelse med temperaturstigning og fordampning). Men da væksthuset ikke er lukket holder denne termodynamiske ligning slet ikke. I stedet betragtes væksthusets energi mere approksimativt efter ligning (6.12). For at kunne foretage prediktion af indetemperatur, er det nødvendigt med en opspaltning af ligning (6.12) i en temperaturligning og en varmekapacitets ligning. For at gøre dette skal det altså fastlægges hvordan energien passerer frem og tilbage fra varme til latent varme. Det er nødvendigt at gøre nogle antagelser for at modellere dette. Planternes fordampning er en meget kompliceret proces. I dagslys og under "normale" forhold, vil spalteåbningerne være åbne, og fordampningen vil med god tilnærmelse være proportional med damptryksdeficittet, D, [Salisbury and Ross, 1985]. Derudover vil der indgå en faktor M, der vil være forbundet til planteart, samlet plantemasse mv. Samtidig forudsættes det, at der kan ses bort fra fortætningen således, at det fordampede vand blot transporteres bort ved ventilation til udeluften. Med disse forudsætninger fås

$$c_m \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{r_i}(T_i - T_m) \tag{6.13}$$

$$c_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{r_a}(T_a - T_i) + \frac{1}{r_i}(T_m - T_i) + \phi_s + \phi_h - MD \tag{6.14}$$

$$\frac{dC_v}{dt} = \frac{1}{r_v}(C_a - C_v)V_a + MD \tag{6.15}$$

Ligning (6.13), (6.14) og (6.15) kan skrives op i tilstandsform som:

$$\begin{bmatrix} dT_m \\ dT_i \\ dC_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_i c_m} & \frac{1}{r_i c_m} & 0 \\ \frac{1}{r_i c_i} & -(\frac{1}{r_a c_i} + \frac{1}{r_v c_i}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{V_a}{r_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m \\ T_i \\ C_v \end{bmatrix} dt +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r_a c_i} & \frac{1}{c_i} & \frac{1}{c_i}A_w & 0 & -M \\ 0 & 0 & 0 & \frac{V_a}{r_v} & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ \phi_h \\ \phi_s \\ C_a \\ D \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} dw_m \\ dw_i \\ dw_v \end{bmatrix} \tag{6.16}$$

Den forklarende styrke af denne model afhænger af, hvor godt ventilationsprocessen og fordampningsprocessen er beskrevet. Det kan imidlertid kun undersøges ved at regne konkret på modellerne, hvad der ikke har været tid til indenfor rammerne af dette projekt.

6.5.5 Andre forhold

De viste resultater er baseret på et enkelt forsøg, som blev udført på en varm årstid. Dette var uheldigt af flere årsager. I en stor del af forsøgsperioden steg temperaturen i væksthuset så meget, at det var nødvendigt at åbne luftvinduerne for ikke at skade planterne varigt. Når vinduerne åbnes, ændrer væksthuset sig drastisk i energimæssig forstand, hvorfor perioder med åbne vinduer ikke kan benyttes. Den længste periode uden ventilation var i dette forsøg af 4 døgns længde. PRBS-signalet havde en periode på 7 døgn. Derved opstår der en vis korrelation mellem signalet og klimavariablene, som det har været nødvendigt at se bort fra.

Som tidligere nævnt har gardinerne været trukket 80% for i forsøgs perioden. Herved er konvektionsstrømme og indstrålingsforhold ændret i forhold til både væksthuse med og uden gardin. De særlige forhold omkring tidspunkterne for gardinernes bevægelser før og efter natperioden har derfor ikke kunnet undersøges.

Lufttemperaturen i væksthuset har været målt i een aspireret boks. Det er således forudsat, at denne er repræsentativ for hele huset — en forudsætning, som er tvivlsom. Alvorlige brister i denne forudsætning vil medføre usikkerheder i estimationerne. I fremtidige forsøg bør lufttemperaturen derfor måles mere end et sted.

Kapitel 7

Regulerings-strategier

7.1 System betragtninger

Som omtalt i indledningen er en system tankegang grundlæggende i dette projekt. Systemet tænkes at omfatte alle de elementer der har betydning for indendørs klimaet i et væksthus. Det vil sige: udendørsklima, væksthusets egne klima karakteristika og endelig den regulering som der foretages. Dette system er så underopdelt for at opnå større overskuelighed. For hver del er der, eller tænkes der, opstillet modeller til beskrivelse af dynamikken. Afgrænsningen af systemet hænger nøje sammen hvilke typer af reguleringsmetoder man tænker sig at benytte. Hvis man ikke er interesseret i at udnytte muligheden for at forudsige vejret, så er det ikke nødvendigt med en klima model, man kan istedet nøjes med at lave en registrering af klimavariablene og bruge dem direkte i en styring. Det kan godt tænkes at foregå sammen med en varmedynamisk modellering af væksthuset. Hermed vil en del af vejrets dynamik, eller træghed, formentlig være bestemt implicit gennem modellen for drivhuset.

Hvis man foretager en traditionel styring af væksthuset, f.eks. ved proportional regulering, har man slet ikke behov for at foretage egentlige modelleringer. Til gengæld kan man så heller ikke opnå de fordele, som der forventeligt ligger i at benytte dynamiske modeller.

Dette projekt har kun omhandlet reguleringen af et væksthus ad gangen, men i forbindelse med centrale opvarmningssystemer, enten på det enkelte gartneri eller ved fjernvarmenet, er det imidlertid meget relevant at overveje reguleringen af flere væksthuse samtidig. Dette problem kan bedst løses ved hjælp af en hierakisk tilgang. Med det menes, at man først foretager en overordnet regulering, f.eks. for et helt gartneri. Den udstikker nogle rammer (f.eks. i form af "fiktive" tidsvarierende energi priser), som derefter bruges som input til reguleringen af det enkelte væksthus. Denne fremgangsmåde er nødvendig, fordi det vil være teoretisk og praktisk uoverkommeligt at optimere reguleringen af et helt gartneri med mange væksthuse på en gang. Denne problemstilling skal kun antydes her, idet det dog understreges at man ved yderligere udbygninger af modellerne også vil kunne håndtere denne type problemer.

I kapitel 5 er udeklimaet blevet behandlet. I det endelige system vil klimamodellen have to komponenter: en deterministisk del som beskriver de ting, man ved på forhånd. Det drejer sig om indstrålingen, som har en fast maximal kurve, der er en funktion af klokkeslæt og årstid. Derudover er der en stokastisk del af klimamodellen, der for indstrålingens vedkommende skal forklare hvor stor en procentdel af den maksimale indstråling der rent faktisk bliver observeret. Udetemperatur og vind må beskrives med rent stokastiske sammenhænge.

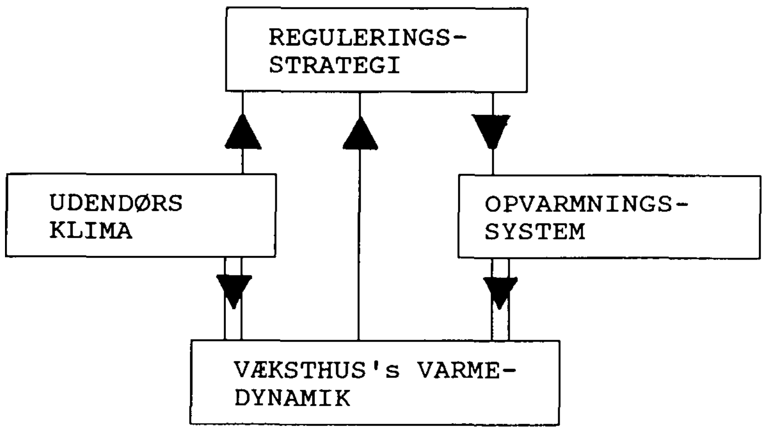
I kapitel 6 er der opstillet forskellige modeller for væksthusets varmedynamik. Denne varmedynamik er hidtil betragtet som en samlet enhed. I en videreudvikling af dette projekt vil det nok være nødvendigt med en mere detaljeret, 2-delt beskrivelse. En del der indeholder selve væksthuset, og en del der indeholder opvarmningssystemet. Hidtil er det antaget, at for et givet styresignal kom der simultant et givet varmeoutput fra varmefladerne i væksthuset. For varmvands systemer er det naturligvis ikke korrekt. Der er dels en forsinkelse før det varme vand når frem, og dels foregår der kun en langsom afkøling af vandet i rørene når tilførslen af varme ophører. Disse ting gør det formentlig nødvendigt at foretage en selvstændig modellering af overføringsfunktionen mellem styresignal og temperatur på varmefladerne.

Det endelige system kan enten tænkes som en samlet integreret model, hvor klima, væksthus og reguleringsstrategi integreres. Eller man kan forestille sig problemet mere sekventielt (enten fordi det er mere pædagogisk eller (måske), fordi det vil være mindre krævende beregnings- og pladsmæssigt). I så fald vil man først have en klimamodel, der på baggrund af nuværende og fortidige observationer forudsiger klimaet et stykke tid frem. Dernæst vil man have en væksthusmodel, der på baggrund af nuværende indeklima, og udeklima forudsigelserne, laver en fremskrivning af indeklimaet under forudsætning af konstant styresignal. Så vil man have en reguleringsstrategi, der udfra en sammenvejning af plantekomfort og energiomkostninger finder den ønskede opvarmning et stykke tid frem. Endelig vil man have en model af opvarmningssystemet, som kan finde det styresignal, der vil give det ønskede forløb af opvarmningen. I figur 7.1 er skitseret de ovenfor beskrevne forløb.

De regulerings principper som man kan forestille sig integreret i et endeligt system har ikke været studeret særskilt i dette projekt. I næste afsnit omtales kort nogle af problematikkerne omkring denne regulering.

7.2 Matematiske modeller for regulering

En god digital regulering forudsætter en relativt præcis model for det system, der skal reguleres. Skal det lykkes at forbedre den traditionelle analog-regulering af en (i det store og hele) konstant temperatur i væksthuse, således at temperatur svingninger tillades (mod en forbedret energianvendelse), kræves der altså dels en god forståelse af varmedynamikken og dels en viden om, hvorledes planteudbyttet bliver under mere varierende klimaforhold. Hertil kommer spørgsmålet om, hvordan man rent matematisk kan udtrykke "plantekomforten's" afhængighed af klimavariablene således at der kan ske en kvantitativ sammenvejning af energi-forbrug og "komfort-tab". Disse spørgsmål diskuteres lidt nøjere i det følgende startende med en kort omtale af nogle relevante reguleringsprincipper.



Figur 7.1: System regulerings diagram. Enkelt pile repræsenterer data flow. Dobbelt pile repræsenterer fysiske påvirkninger

Den lineær-kvadratiske regulering (LQ-regulering) tager sit udgangspunkt i den diskrete (eller "samplede") tilstandsmodel (+støj) for det regulerede system (j.v.r. afsnit 4.3 ligning 4.66 og 4.79):

$$T_{t+1} = \mathbf{\Phi}\, T_t + \mathbf{\Gamma}\, U_t + v_t$$

(den dynamiske ligning + støj)

$$T_t^r = \mathbf{C}\, T_t + e_t$$

(observations-ligning + støj)

Disse ligninger beskriver dynamikken i systemet, og der kan estimeres parametre, foretages interpolationer og beregnes fremskrivninger af systemets tilstand. I det tilfælde, hvor en styring af systemet er aktuel, kan vi tænke os tilstandsvariablen T_t normeret således, at værdien 0 svarer til den optimale (ønskede) tilstand. Man vil så være interesseret i at holde systemet i nærheden af den optimale tilstand. Med analog-regulering, som omtalt i kapitel 3, bruger man fejlen, d.v.s. afstanden fra den aktuelle værdi til den optimale værdi, som input til regulerings-enheden. Man bekymrer sig ikke om "omkostningerne" ved at opretholde den optimale tilstand.

I det tilfælde, hvor man er istand til at styre systemets input U_t, har man også den mulighed at prøve på at styre systemet således, at "omkostningerne" ved styringen afvejes mod afvigelsen fra det optimale. LQ-regulering benytter en kvadratisk "kriterie-funktion":

$$\sum_{t=0}^{t=\infty} \left(T_t' \mathbf{Q}_1 T_t + U_t' \mathbf{Q}_2 U_t \right)$$

Denne funktion sammenvejer den afvigelse, systemet har haft fra sin optimale værdi (som her er 0), med den samlede "mængde" input (f.eks. energi) , der har været anvendt for at holde systemet omkring optimum. Man er altså interesseret i at minimere begge led i summen; problemet er så, at et lille første-led i summen (d.v.s. systemet befinder sig det meste af tiden omkring sit optimum) koster én et stort andet-led og vice versa. Opgaven er nu at vælge styre-variablen til tid, U_t, som en funktion af den information,der foreligger til tid t, således at kriterie-funktionen antager en så lille værdi som muligt.

At man netop ser på en kvadratisk kriterie-funktion, givet ved de to (positivt-definite) matricer $\mathbf{Q}_1$ og $\mathbf{Q}_2$ skyldes først og fremmest matematisk bekvemmelighed, idet man kan indse, at den bedste måde at styre systemet på (d.v.s. således at kriterie-funktionen antager sit minimum) er en lineær tilbage-kobling:

$$U_t = \mathbf{L}\, T_t$$

Her kan matricen $\mathbf{L}$ i princippet bestemmes udfra de givne størrelser $\mathbf{\Phi}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{Q}_1$ *og* $\mathbf{Q}_2$

Det er imidlertid ikke nødvendigvis oplagt at "straffe" f.eks energi-forbrug med et kvadratisk led i kriterie-funktionen, et lineært led ville nok ofte være mere oplagt. Hvis man benytter lineære led vil den optimale styring blive en on/off regulering, se [Hansen et al., 1986].

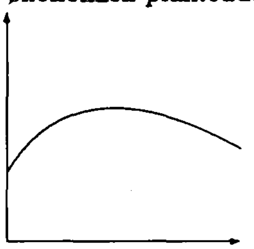
Et andet hovedproblem med denne form for regulering er, at den forudsætter et godt kendskab til det pågældende system. For den tidligere omtalte (se afsnit 3.2.2) regulerings-teknik spiller et nøjagtigt kendskab til systemet en mindre rolle, og er derfor også lettere at anvende med simple midler. Dette leder en over i den såkaldte adaptive regulering, hvor det bliver afgørende, at regulerings-mekanismen er i stand til automatisk at kompensere for ændringer i systemets grundlæggende egenskaber. Denne problemstilling vil givetvis blive af stor vigtighed i de senere faser af dette projekt.

7.3 Reguleringskriterier

Som omtalt i afsnit 7.2 er en direkte metode til regulering at opstille kriterie-funktioner (tabsfunktioner), som minimeres. Tabsfunktionerne kan være funktioner af tilstandene i væksthuset, af kontrolvariablene (energitilførsel mm.) og af tidspunktet. Med tidspunktet menes tidspunktet på døgnet, på året eller måske i forhold til en kultur vækstperiode.

Hvis man i første omgang tænker på planteudbyttet som værende lig tilvæksten af planterne, vil den være en funktion af ihvertfald fire variable, som i princippet kan kontrolleres: indetemperaturen, lysmængde, $CO_2\%$ og luftfugtighed.

Luftfugtigheden kan i ethvert væksthus blive for høj (med fugtnedslag og e.v.t. svampeangreb til følge), men i formerings-huse er udtørring ligeledes et reelt problem, der kræver opmærksomhed. Det vil derfor formentlig være rimeligt at bevare kontrollen af luftfugtigheden som en overstyring: hvis fugtigheden overstiger en vis grænse foretages der udluftning, eller opvarmning, uafhængigt af hvad dét iøvrigt betyder for klimaet; hvis fugtigheden er for lav tilføres vand i form af vanding, tåge eller lignende. Af de resterende tre variable er det klart, at dette projekt fokuserer på indetemperaturen, men metoderne kan i princippet udvides til at gælde alle tre variable.



Figur 7.2: Skitse af økonomisk planteudbytte som funktion af temperaturen.

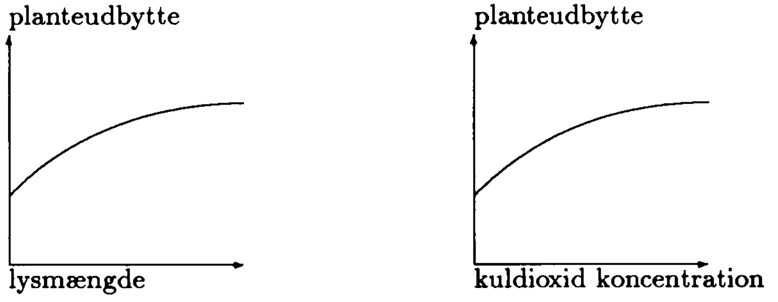
Forløbet af det økonomiske planteudbytte som funktion af temperaturen for fastholdt lysmængde og CO_2 er skitseret i figur 7.2. Det karakteristiske er, at det er en blød kurve, der har et optimum. Placering af optimum og krumning vil naturligvis variere fra den ene afgrøde til den anden. For den samme afgrøde vil det også have betydning, hvilke lysmængder og CO_2-koncentrationer, der er tale om. Tabsfunktionen for planteudbyttet kan direkte relateres til selve planteudbyttet. Nemlig som differensen mellem det optimale udbytte og udbyttet ved en anden temperatur (hvis temperaturen er den eneste relevante variabel).

Men samtidig er det klart, at der eksisterer øvre og nedre temperaturer, der ikke må overskrides eller underskrides. Hvis dét sker, må der sættes ind med maksimal udluftning, resp. opvarming. Dette problem kan formentlig løses uden specielle betingelser på reguleringsmodellen men blot ved at foretage en korrekt vægtning mellem energiomkostninger og tab i planteudbytte.

Hvis man inddrager alle tre klimavariable samtidig, bliver tabet i planteudbytte til en funktion af tre variable. Som beskrevet i afsnit 7.2 frembyder dette i det kvadratiske tilfælde ingen matematiske problemer.

Imidlertid er planteudbyttet som funktion af enten lysmængde eller CO_2 dårligt beskrevet ved en kvadratisk funktion. Funktionerne i de relevante intervaller antager nærmere en form som skitseret i figur 7.3, se f.eks. [Salisbury and Ross, 1985].

Når temperaturkriterierne skal opstilles, er der to forhold mht. en evt. tidsvariation, der kan overvejes. For det første, om der skal være en døgnvariation i fastlæggel-



Figur 7.3: Skitse af planteudbytte som funktion af lysmængde hhv. kuldioxid-koncentration.

sen af den optimale temperatur, svarende til, at man styrer efter forskelligt sætpunkt dag og nat (se f.eks. [Nielsen og Amsen, 1989]) For det andet, om der kan indbygges en form for integration af temperaturen over tid. Det sidste kan begrundes med nye forskningsresultater, der viser, at indenfor visse temperatur-intervaller er planteudbyttet ikke så følsomt overfor temperaturvariationer, når blot den integrerede temperatur er konstant [Nielsen og Amsen, 1989].

Omkostningerne ved opvarmning kan formodentlig med en rimelig approksimation opfattes som lineære i det tilfælde hvor gartneriet selv leverer energien.

Hvis energien hentes fra et fjernvarmeværk, vil man ofte, udover forbrugte m^3-vand (eller forbrugte antal kalorier), skulle betale for retten til at belaste systemet op til en vis "spidsbelastnings-grænse". Denne ekstra omkostning udgør en væsentlig del af energi-budgettet og det er derfor af vigtighed at kunne sætte sin "spidsbelastnings-grænse" så lavt som muligt. I selve reguleringen kommer det til at betyde, at man indbygger en øvre grænse for størrelsen af styresignalet (energi-forbruget). Endvidere har nogle fjernvarme-værker priser, der er afhængige af tidspunktet på døgnet

I modsætning til de modeller, der er omtalt i afsnit 7.2 er reguleringen af temperaturen ikke symmetrisk omkring det optimale punkt. Ved for høje temperaturer kan der bruges skyggegardiner og udluftning. Udluftningen bruges som regel som en simpel on/off styring: hvis temperaturen når over en vis grænse, luftes der, indtil den igen er under en anden (lavere) grænse. Brugen af skyggegardiner er mere varieret og kan enten styres af temperaturen eller af indstrålingen.

Under alle omstændigheder har man altså det problem, at tabsfunktionen for den vigtigste styrevariabel, energien, formentlig dårligt kan beskrives ved en kvadratisk omkostning. Man må så nærmere overveje hvorledes styringsstrategien kan tage højde for dét.

Sammenvægtningen af de forskellige omkostninger kan i princippet findes ud fra rent økonomiske overvejelser. Priser på energidelen er lette at fastsætte, mens priser på reduceret planteudbytte er mere problematiske. For det første er det nødvendigt at have viden om det rent fysiologisk reducerede planteudbytte (både kvantitet og kvalitet), og dernæst er det nødvendigt at inkorporere den økonomiske betydning af et sådant reduceret udbytte. Det kan gøres ved at benytte relevante markedspriser for produkterne. På den anden side er der en række fordele, hvis disse forhold først er opfyldt. For det første vil reguleringen automatisk tage højde for ændrede ydre omstændigheder, såsom årstiden. For det andet vil det være nemt at tage højde for skiftende priser på energi eller planter, idet de blot optræder som konstanter i reguleringen.

Kapitel 8

Konklusion

Baggrunden for dette projekt er, at energiforbruget i væksthuse er ganske stort. Selv procentvis små energibesparelser har derfor stor betydning.

Energibesparelserne i dette projekt tænkes opnået ved at kombinere nye muligheder for at benytte mikrocomputere i gartnerier med avancerede matematisk-statistiske reguleringsmetoder. Den præcise regulering forudsætter samtidig detaljerede og præcise målinger af ude- og indeklima variable. Det drejer sig naturligvis især om temperatur og stråling. Denne forudsætning vil imidlertid næppe udgøre nogen forhindring i forhold til eksisterende praksis, idet der allerede er mange gartnerier hvor disse størrelser måles og registreres af en klimacomputer. Den økonomiske relevans og tekniske baggrund for de påtænkte metoder ses således at være til stede.

Et gennemgående træk ved den foreliggende rapport er system-tankegangen. Udeklimaet, væksthuset med opvarmningssystem samt reguleringsprincipperne tænkes at udgøre et samlet system. For at kunne behandle problemstillingen rationelt er det nødvendigt at opdele dette system, og der opstilles derfor først separate modeller for hvert af delområderne. Det bliver altså tale om en klimamodel, en model for væksthusets varmedynamik og en model for reguleringen. De to første modeller har dette projekt givet foreløbige bud på. Modellen for regulering er ikke behandlet udførligt, hvilket derfor skal ske i fase 2 af projektet. Nødvendigheden af at opstille deciderede modeller på de forskellige områder, hænger nøje sammen med et ønske om at kunne forudsige fremtidige værdier af vigtige størrelser på baggrund af fortidige og nutidige observationer. Hvis man kan dette, kan man også forudse hvornår, der er et stort behov for opvarmning, og *hvornår et tilsyneladende stort behov kun er et forbigående fænomen.* Det sidste er ofte tilfældet tidligt om morgenen, når udetemperaturen når et minimum, samtidig med, at der kun er relativt kort tid til, at solens indstråling vil begynde at få en betydning.

Der har været udført estimationer på to områder: klimamodel og model for væksthusdynamik. Data til grund for klimamodellen har været samplet med 1 times intervaller. Det er for lang tid i forhold til, hvad der anses for nødvendigt videre frem. Men alligevel forventes det, at de estimerede modeller vil ligne de modeller, som i fase 2 skal bruges til at forudsige klimaet med (kun tids prognose).

Væksthus forsøgene blev foretaget i maj-juni 1989. Det er et problem, at det ikke kunne lade sig gøre at lave forsøget tidligere, da vejret i maj var varmt og med meget solstråling. Det gjorde det nødvendigt at have gardinerne trukket 80% for i hele forsøgsperioden. Dernæst var det ofte nødvendigt at ventilere om dagen. Da ventilation totalt ændrer varmeforholdene for en bygning, kan man dårligt benytte datasekvenser for tidsrum, hvor der har været ventileret.

Det var muligt at udtrække en 4 dages sekvens næsten uden ventilation og foretage beregningerne på denne sekvens. Der estimeredes dels en lineær stokastisk tilstandsmodel og dels en ARIMA model.

Tilstandsmodellen har den fordel, at parametrene er direkte fysisk fortolkbare, idet der er tale om varmekapaciteter og varmeovergangsmodstande. Den opstillede model havde to varmekapaciteter. Den første svarende til luften i væksthuset samt måske plantedele og overside af borde etc. Den anden varmekapacitet svarede til faste bygningsdele samt gulv. Luftens varmekapacitet kan udregnes ved en statisk betragtning, for given temperatur og luftfugtighed. Der viser sig at være en udemærket overensstemmelse mellem en statisk og en dynamisk bestemmelse af varmekapaciteten af luften i væksthuset. Tilsvarende kan den estimerede varmeovergangsmodstand mellem væksthuset og det ydre, sammenlignes med standardtal for statiske beregninger (brugt ved dimensionering af væksthuses varmesystem). Også her fås en udemærket overensstemmelse. Endelig kan man finde tidskonstanterne for modellen ud fra de estimerede parametre. De bliver på henholdsvis 8 minutter og 70 minutter. Disse to konstanter kan, med stor forsigtighed, sammenlignes med tidskonstanter fundet for lavenergihuse ved tilsvarende forsøg. De vil typisk ligge på omkring 25 minutter og godt 100 timer (se [Hansen et al., 1986]).
Resultatet er altså, som forventet, at væksthuse reagerer langt hurtigere på ændringer i de ydre klimavariable end lavenergihuse.

ARIMA modellen blev estimeret på den samme datasekvens som tilstandsmodellen. Der blev dels fundet en model for væksthusets egendynamik, og dels en overføringsfunktion fra udeklimaet. Ud fra egendynamikken kan man beregne en tidskonstant der fås til et sted mellem 6 og 10 minutter, afhængigt af hvilken af de undersøgte modeller der betragtes. Der opnås således på dette punkt en bestyrkende overensstemmelse med estimationen via tilstandsmodellerne. Man kan altså konkludere, at de estimerede modeller ser meget troværdige ud. Sammenligninger mellem de to modeltyper, og sammenligninger med statiske beregninger samt sammenligninger med dynamiske beregninger på andre bygninger, underbygger dette.

Appendix A

Projektets formål og baggrund

Denne rapport er resultatet af et EFP projekt (Energiministeriets Forsknings Program) løbende fra 1/3 1989 til 31/8 1989. Projektet har været et forprojekt (fase 1), der tænkes efterfulgt af et større projekt (fase 2) løbende fra 1991 til 1993. Der har været fire deltagende institutter: Afdeling for Biometri og Informatik (ABI) og Institut for Matematisk Statistik og Operationsanalyse (IMSOR), har stået for de statistiske analyser og modeludvikling. Sektionen for gartneriteknik under Institut for Væksthuskulturer (IfV) og Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), har stået for de udførte forsøg og den praktiske viden om væksthusteknik. ABI og IfV er institutter under Statens Planteavlsforsøg. IMSOR er et institut på Danmarks Tekniske Højskole. Rapporten er skrevet med to formål for øje. For det første skal den være en dokumentation af, hvad der er opnået i løbet af projekt perioden, overfor bevillingsgiver og andre interesserede. For det andet skal rapporten i fase 2, for projektgruppen selv, fungere som reference til fase 1. Hensynet til sidste formål forklarer, hvorfor nogle af kapitlerne er temmelig omfangsrige.

Appendix B

Projektets videre indhold

Denne rapport er dokumentation for første fase i et EFP-projekt (Energiministeriets Forsknings Program). Anden fase indledes i vinteren 1990/91 med endnu et forsøg i væksthuse i Årslev.

Forsøget skal, som det allerede udførte forsøg, designes således, at energitilførslen styres efter en PRBS–sekvens. Det er vigtigt, at forsøget bliver udført om vinteren, da det er på denne årstid, det største opvarmningsbehov for væksthuset ligger.Det er derfor også mest interessant at få beskrevet varmedynamikken på denne årstid, da det er meget muligt, at nogle af "konstanterne" i den varmedynamiske model varierer i løbet af året.

Når resultaterne fra dette forsøg er indsamlet, skal analyse og modelbygning, der har været indledt i fase 1, gentages og udbygges. Der skal således opstilles endelige modeller for klima, væksthusets varmedynamik og opvarmningssystemets varmedynamik. For klimamodellens vedkommende er det formentlig især sammenbygningen af en deterministisk og en stokastisk del, der vil kræve en indsats. For væksthusets varmedynamik er det et centralt spørgsmål om fordampning og kondensation skal inddrages eksplicit. Det er væsentligt, da det er store energimængder der flyttes rundt på denne måde. Det vil formentlig give en større præcision i modelleringen, når disse forhold inddrages.

Et andet spørgsmål er, hvorvidt modellen skal have flere tidskonstanter end de to, der har været benyttet i de allerede udførte analyser.

Et tredje spørgsmål er, om der skal indføjes andre klimavariable end indstråling og udetemperatur. F.eks. kan vindhastigheden inddrages, indstrålingen kan splittes op i direkte stråling og diffus stråling etc.. Varmedynamikken af opvarmningssystemet vil formentlig ikke være besværlig at modellere, og kan måske beskrives med ikke-stokastiske metoder.

Når de "endelige" modeller er opstillet for klima og varmedynamik, skal hovedindsatsen vendes mod at undersøge, hvordan forskellige typer af regulering vil virke. Det indebærer i første omgang et teoretisk studium af forskellige typer af regulering, og overvejelser af, hvad der er hensigtsmæssige reguleringskriterier. Her er lineær-kvadratisk regulering en oplagt mulighed, som kan afveje plantekomfort mod energiomkostninger. Der er dog to ulemper ved denne reguleringstype. For det første straffes energi forbrug kvadratisk. For det andet antages det, at det er muligt at disponere over ubegrænset effekt (denne form for regulering kan foreskrive anvendelse af meget stor effekt i små tidsrum).

Der er således et klart behov for undersøgelse af forskellige typer af reguleringer fra teorien, samt eventuelt nogle til problemet opfundne "ad hoc metoder". Næste problem bliver at undersøge disse reguleringer i forhold til det foreliggende system. Den bedste måde at gøre det på, er at afprøve reguleringerne i praksis på et væksthus. Det ville imidlertid være omstændeligt og dyrt, så undersøgelsen tænkes i første omgang gennemført ved at benytte de udviklede modeller til at *simulere* med.

Man kan f.eks. benytte historiske klimadata, eller med en klimamodel simulere et klima af den ønskede længde og med de samme karakteristika, som er fundet udfra forsøgene. Udeklimaet bestemmer, sammen med et givet input fra opvarmningssystemet, hvordan væksthuset vil reagere. Dette respons kan nu udregnes ved hjælp af væksthus modellen. Opførslen af væksthuset virker så tilbage på opvarmningssystemet via reguleringsstrategien.

På denne led kan et antal forskellige reguleringsstrategier undersøges, ved at benytte de fundne modeller og computersimulering.

Det skal dog understreges, at kvaliteten af simuleringerne ikke bliver bedre end modellerne i sig selv. Det er derfor vigtigt at modellerne beskriver det virkelige systems opførsel godt. Disse undersøgelser af forskellige regulerings metoder skal ende med, at en eller to metoder trækkes frem som de bedste, for dernæst at blive afprøvet "i praksis" på forsøgsvæksthuse i Årslev.

En endelig afprøvning på kommercielle væksthuse ligger desværre uden for rammerne af fase 2 af dette projekt, men kan måske foretages i en efterfølgende fase 3. Det skal dog understreges, at projektgruppen føler sig overbevist om, at resultaterne fra forsøgsvæksthusene i hovedtræk vil kunne overføres til kommercielle væksthuse. Men dette forhold behøver naturligvis en selvstændig verifikation i praksis. Et andet praktisk spørgsmål er, hvordan en given udvalgt reguleringsstrategi kan implementeres på standard hardware. Hvilke krav vil der blive stillet til beregnings- og lagerkapacitet af den mikrocomputer, der skal udføre reguleringen. Det er endnu ikke afgjort, hvorvidt det kan nås at undersøge dette spørgsmål indenfor fase 2.

Referencer

[Adamson, 1968] Adamson, B., 1968: *Värmebalans vid Rum och Bygnade*. Lund Tekniske Högskola, 80 pp.

[Amsen, 1977] Amsen, M. G., 1977: *The role of background radiation in radiant heat transfer between plane parallel surfaces.* Yearbook, Royal Veterinary and Agricultural University, 98-109.

[Amsen og Frøsig, 1985] Amsen, M.G., Frøsig, O.N., 1985: *Energy Consumption and Environmental Parameters in different types of Greenhouses. Seasons 15 august - 30 april 1983-84 and 1984-85*, Danish Jour. Plant and Soil Sci., 91, 145-156.

[Andersen, 1974] Andersen, B., 1974: *TEMPFO 4 - Indetemperatur og Energiforbrug i Bygninger beregnet med Reference Årets Vejrdata.* SBI-rapport Nr. 93, 34 pp.

[Box og Jenkins, 1976] Box, G.E.P., og G.M. Jenkins, 1976: *Time Series Analysis, Forecasting and Control.* Holden-Day, 575 pp.

[Conradsen, 1979] Conradsen, K.,1979: *Introduktion til statistik*, Bind 2A, IMSOR, Danmarks Tekniske Højskole, 693 pp.

[DS418, 1986] Dansk Standard DS418, 5.udgave 1986: *Beregning af Bygningers Varmetab*, 60 pp.

[Degelman, 1976] Degelman, O.L., 1976: *A Weather Simulation Model for Building Energy Analysis*, ASHRAE Trans., 435-447.

[Ehler og Rystedt, 1988] Ehler, N. og Rystedt, J., 1988: *Klimastyring i væksthuse ved hjælp af informationsteknologi.* Slutrapport til Teknologistyrelsen, 25 pp.

[Godfrey, 1980] Godfrey, K.R., 1980: *Correlation Methods.* Automatica, 16, 527-534.

[Goodwin og Payne, 1977] Goodwin, G.C. og Payne, R.L., 1977: *Dynamic System Identification.* Academic Press, 291 pp.

[Grav, 1985] Grav, K., 1985, *Brugervejledning for edb-programmet TSBI, Termisk Simulering af Bygninger og Installationer* , Statens Byggeforskningsinstitut, 141 pp.

[Gringorten, 1966] Gringorten, I.I., 1966: *A Stochastic Model of the Frequency and Duration of Weather Events.* J. Appl. Meteor., 5., 606-624.

[Hammarsten, 1984] Hammarsten, S., 1984: *Estimation of Energy Balances for Houses.* The National Swedish Institute for Building Research, Gävle, 165 pp.

[Hansen et.al, 1981] Hansen, S., Jensen, S.E. og Aslyng, H.C., 1981: *Jordbrugsmeteorologiske Observationer, Statistisk Analyse og Vurdering, 1955 - 1979.* Hydrologisk Laboratorium. Landbohøjskolen, 414 pp.

[Hansen et al., 1986] Hansen, F.M, Madsen, H. og Holst, J.: *Estimation of Continuous Time Models for the Heat Dynamics of a Building.*, Interim Paper, IMSOR, Danmarks Tekniske Højskole, 31 pp.

[Heilmann og Hansen, 1985] Heilmann, T. og Hansen, L.A., 1985: *Regulerings Teknik*, Akademisk forlag, 237 pp.

[Hejndorf og Kristensen, 1977] Hejndorf, F. og Kristensen, K., 1977: *Undersøgelser af vækstfaktorer ved produktion af potteplanter (Hedera) i væksthus.* Tidsskr. for Planteavl, 82, 165-172.

[Holst et.al., 1987] Holst, J., Madsen, H. og Thyregod, P., 1987: *A Method for Using Hourly Predictions of Weather Observations in Optimal Control of Heat Supply to Buildings.* 3. International Congress on Building Energy Management, 380-389.

[Lund, 1979] Lund, H., 1979: *Program BA4, Users Guide.* Thermal Insulation Laboratory, Report No. 44, Technical University of Denmark, 71 pp.

[Lynnerup, 1989] Lynnerup, M., 1989, *CTLSM*, IMSOR, Danmarks Tekniske Højskole, 50 pp.

[Madsen, 1985] Madsen, H., 1985: *Statistically Determined Dynamical Models for Climate Processes.* Licentiatafhandling, IMSOR, Danmarks Tekniske Højskole, 428 pp.

[Madsen et.al, 1985] Madsen, H., Thyregod, P. og Spliid, H., 1985: *Markov Models in Discrete and Continuous Time for Hourly Observations of Cloud Cover.* Jour. of Climate and Appl. Meteor., 24, 629-639.

[Madsen et.al., 1987] Madsen, H., Holst, J. og Thyregod, P., 1987: *A Continuous Time Model for the Variations of Air Temperature.* 10. Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Science, American Meteorological Society, 52-58.

[Madsen og Thyregod, 1988] Madsen, H. og Thyregod, P., 1988: *Modelling the Time Correlation in Hourly Observations of Direct Radiation in Clear Skies.* Energy and Building, 11, 201-211.

[Madsen, 1989] Madsen, H., 1989: *Tidsrækkeanalyse.* IMSOR, Danmarks Tekniske Højskole, 345 pp.

[Nielsen et al., 1980] Nielsen, V., Klougart, A., og Jensen, J. Hjelmdal, 1980: *Væksthus-teknik.* Væksthusinfo, 199 pp.

[Nielsen og Nielsen, 1984] Nielsen, A.A., og Nielsen, B.K., 1984: *A Dynamic Test Method for the Thermal Performance of Small Houses.* Proceedings from the American Council for an Energy-Efficient Economy. California. b207-b220.

[Nielsen og Amsen, 1989] Nielsen, O. Frøsig og Amsen, M.G.,1989: *Simple techniques for reduction of energy consumption peaks in greenhouses.* Tidsskr. Planteavl, 93, 27-36

[van Passen, 1981] van Passen, A.H.C., 1981: *Indoor Climate, Outdoor Climate and Energy Consumption.* De Technische Hogeschool, Delft, 123 pp.

[Salisbury and Ross, 1985] Salisbury, B.J. og Ross, C.W., 1985: *Plant Physiology*, Wadsworth, Belmont, California, 540 pp.

[SAS/ETS, 1988] SAS Institute Inc., 1988: *SAS/ETS User Guide*, Version 6, Cary, NC, 560 pp.

[Strøm et al.,1987] Strøm, J. (redaktion), 1987: *Energi og Klima i Væksthusgartnerier*. NJF-seminar 1985. SBI-landbrugsbyggeri pub. 69, 288 pp.

[Troelsgaard, 1982] Troelsgaard, B., 1981: *Statistical Determination of Dynamical Models for Variations in Room Temperature*. IMSOR Research report, 21, 18 pp.

[Udink ten Cate, 1983] Udink ten Cate,A.J., 1983: *Modeling and adaptive control of greenhouse climates*. Doktorafhandling ved Landbrugsuniversitetet i Wageningen, Holland, 159 pp.

[Zemansky, 1968] Zemansky, M. W., 1968: *Heat and Thermodynamics*. McGraw-Hill, 658 pp.

[Åström, 1970] Åström, K. J., 1970: *Introduction to Stochastic Control Theory*. Academic Press, 299 pp.

Afdelinger m.v. under Statens Planteavlsforsøg

Direktionen

Direktionssekretariatet, Skovbrynet 18, 2800 Lyngby	45 93 09 99
Informationstjenesten, Skovbrynet 18, 2800 Lyngby	45 93 09 99
Afdeling for Biometri og Informatik, Lottenborgvej 24, 2800 Lyngby	45 93 09 99

Landbrugscentret

Centerledelse, Fagligt Sekretariat, Forskningscenter Foulum, Postbox 23, 8830 Tjele	86 65 25 00
Afdeling for Grovfoder og Kartofler, Forskningscenter Foulum, Postboks 21, 8830 Tjele	86 65 25 00
Afdeling for Industriplanter og Frøavl, Ledreborg Allé 100, 4000 Roskilde	42 36 18 11
Afdeling for Sortsafprøvning, Teglværksvej 10, Tystofte, 4230 Skælskør	53 59 61 41
Afdeling for Kulturteknik, Flensborgvej 22, Jyndevad, 6360 Tinglev	74 64 83 16
Afdeling for Jordbiologi og -kemi, Lottenborgvej 24, 2800 Lyngby	45 93 09 99
Afdeling for Planteernæring og -fysiologi, Vejenvej 55, Askov, 6600 Vejen	75 36 02 77
Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, Forskningscenter Foulum, Postbox 25, 8830 Tjele	86 65 25 00
Afdeling for Arealdata og Kortlægning, Enghavevej 2, 7100 Vejle	75 83 23 44
Borris Forsøgsstation, Vestergade 46, 6900 Skjern	97 36 62 33
Lundgård Forsøgsstation, Kongeåvej 90, 6600 Vejen	75 36 01 33
Rønhave Forsøgsstation, Hestehave 20, 6400 Sønderborg	74 42 38 97
Silstrup Forsøgsstation, Oddesundvej 65, 7700 Thisted	97 92 15 88
Tylstrup Forsøgsstation, Forsøgsvej 30, 9382 Tylstrup	98 26 13 99
Ødum Forsøgsstation, Amdrupvej 22, 8370 Hadsten	86 98 92 44
Laboratoriet for Biavl, Lyngby, Skovbrynet 18, 2800 Lyngby	45 93 09 99
Laboratoriet for Biavl, Roskilde, Ledreborg Allé 100, 4000 Roskilde	42 36 18 11

Havebrugscentret

Centerledelse, Fagligt Sekretariat, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årslev	65 99 17 66
Afdeling for Grønsager, Kirstinebjergvej 6, 5792 Årslev	65 99 17 66
Afdeling for Blomsterdyrkning, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årslev	65 99 17 66
Afdeling for Frugt og Bær, Kirstinebjergvej 12, 5792 Årslev	65 99 17 66
Afdeling for Landskabsplanter, Granlidevej 22, Hornum, 9600 Års	98 66 13 33
Laboratoriet for Forædling og Formering, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årslev	65 99 17 66
Laboratoriet for Gartneriteknik, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årslev	65 99 17 66
Laboratoriet for Levnedsmiddelforskning, Kirstinebjergvej 12, 5792 Årslev	65 99 17 66

Planteværnscentret

Centerledelse, Fagligt Sekretariat, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	45 87 25 10
Afdeling for Plantepatologi, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	45 87 25 10
Afdeling for Jordbrugszoologi, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	45 87 25 10
Afdeling for Ukrudtsbekæmpelse, Flakkebjerg, 4200 Slagelse	53 58 63 00
Afdeling for Pesticidanalyser og Økotoksikologi, Flakkebjerg, 4200 Slagelse	53 58 63 00
Bioteknologigruppen, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	45 87 25 10

Centrallaboratoriet

Centrallaboratoriet, Forskningscenter Foulum, Postbox 22, 8830 Tjele	86 65 25 00

Frederiksberg Bogtrykkeri a·s 911035