LUND UNIVERSITY

Undersökning av ett temperaturregleringssystem

Persson, Anders; Gunulf, Jan; Kiziroglu, George; Settergren, Gösta; Sixtensson, Inge; Svensson, G.; Wensheim, Stefan; Willquist, Lars Olof

1976

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

Link to publication

Citation for published version (APA):
Persson, A., Gunulf, J., Kiziroglu, G., Settergren, G., Sixtensson, I., Svensson, G., Wensheim, S., & Willquist, L. O. (1976). *Undersökning av ett temperaturregleringssystem*. (Technical Reports TFRT-7090). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

Total number of authors:
8

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

TFRT - 7090

UNDERSÖKNING AV ETT TEMPERATURREGLERINGS-SYSTEM

A. PERSSON
J. GUNULF
G. KIZIROGLU
G. SETTERGREN
I. SIXTENSSON
G. SVENSSON
S. WENSHEIM
L O. WILLQUIST

Rapport 7605(C) Februari 1976
Inst. för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET
UTLÅNAS EJ

UNDERSÖKNING AV ETT TEMPERATURREGLERINGSSYSTEM

Anders Persson
Jan Gunulf
George Kiziroglu
Gösta Settergren
Inge Sixtensson
Gengt Svensson
Stefan Wensheim
Lars Olof Willquist

Specialarbete i reglerteknik ht 1975
Handledare: Björn Wittenmark

SPECIALARBETE I REGLERTEKNIK

I) Inledning

2) Beskrivning av luftuppvärmning i fläktrum.

3) Beskrivning av regulatorn

4) Experiment med resultat

5) Modell för rummet

6) Modell för värmebatteriet

7) Modell för hela systemet

8) Simulering

9) Slutord

IO) Referenser

INLEDNING

Detta specialarbete utfördes parallellt med kursen Reglerteknik AK. Avsikten med gruppens arbete var att tillämpa och ev. fördjupa våra kunskaper, genom att undersöka ett konkret reglerproblem.

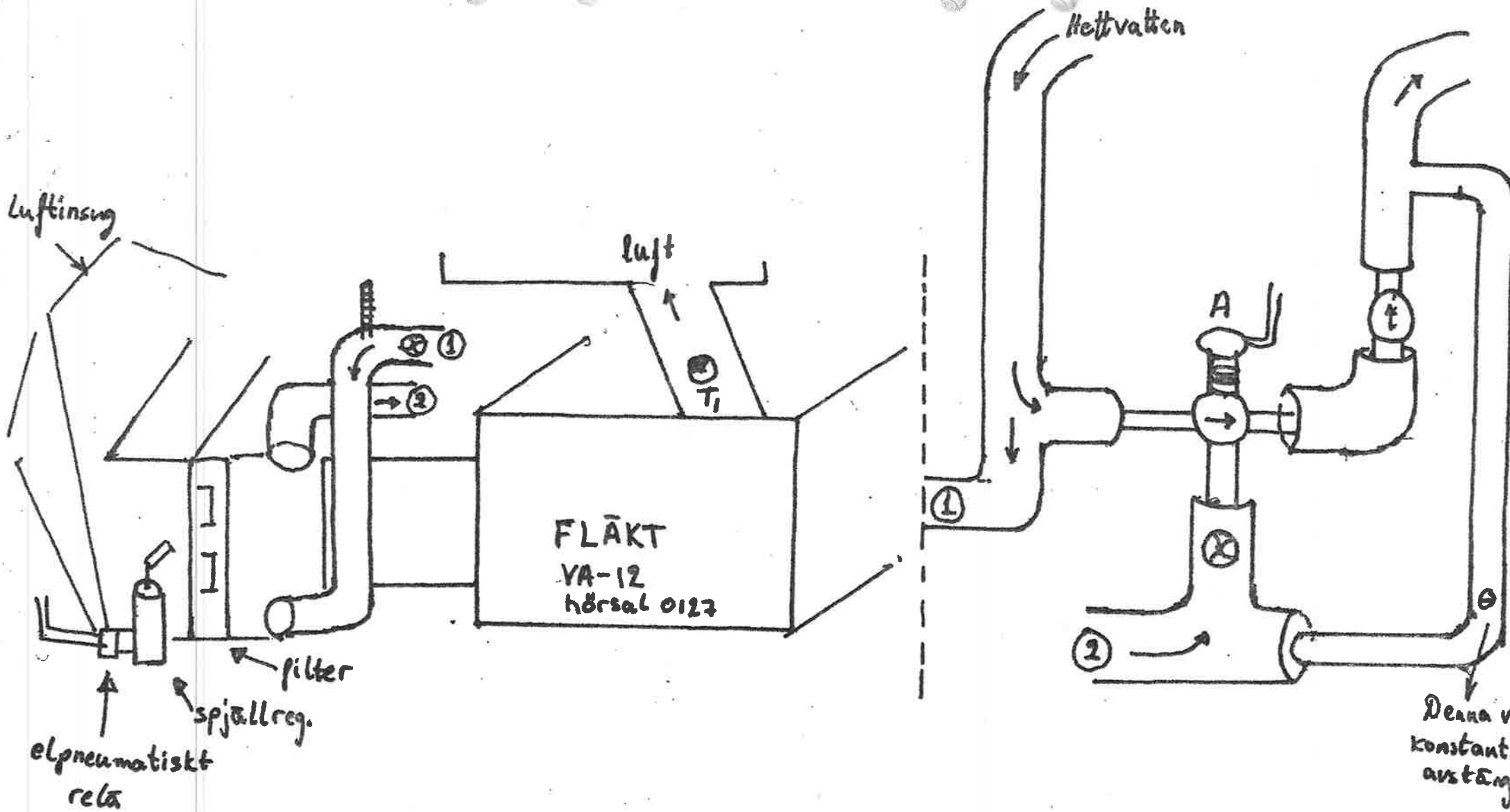
Vi valde att studera hur värmeregleringen i en föreläsningssal fungerade samt sätta upp en modell för systemet. Sal M:A undersöktes eftersom det var en allmänt utbredd uppfattning bland personal och elever att regleringen var dålig. Dessutom hade vi våra föreläsningar i Reglerteknik där.

Arbetsfördelningen tillgick på så sätt att en "modellgrupp" och en "experimentgrupp" utkristalliserades efter intresseinriktning. Experimentgruppen anskaffade instrument, installerade utrustningen och utförde mätningarna. Två försök utfördes, ett med fullsatt föreläsningssal och ett med regulatorn inställd på maxvärde. Modellgruppen kom efter studier i litteraturen fram till modellen, som sedan simulerades på institutionens processdator.

2. Beskrivning av luftuppvärmning i fläktrum.

Uppvärmningen av inblåsluften tillgår enligt den pricip som fig. 2.1 anger, dvs. enligt följande (jämför figuren):

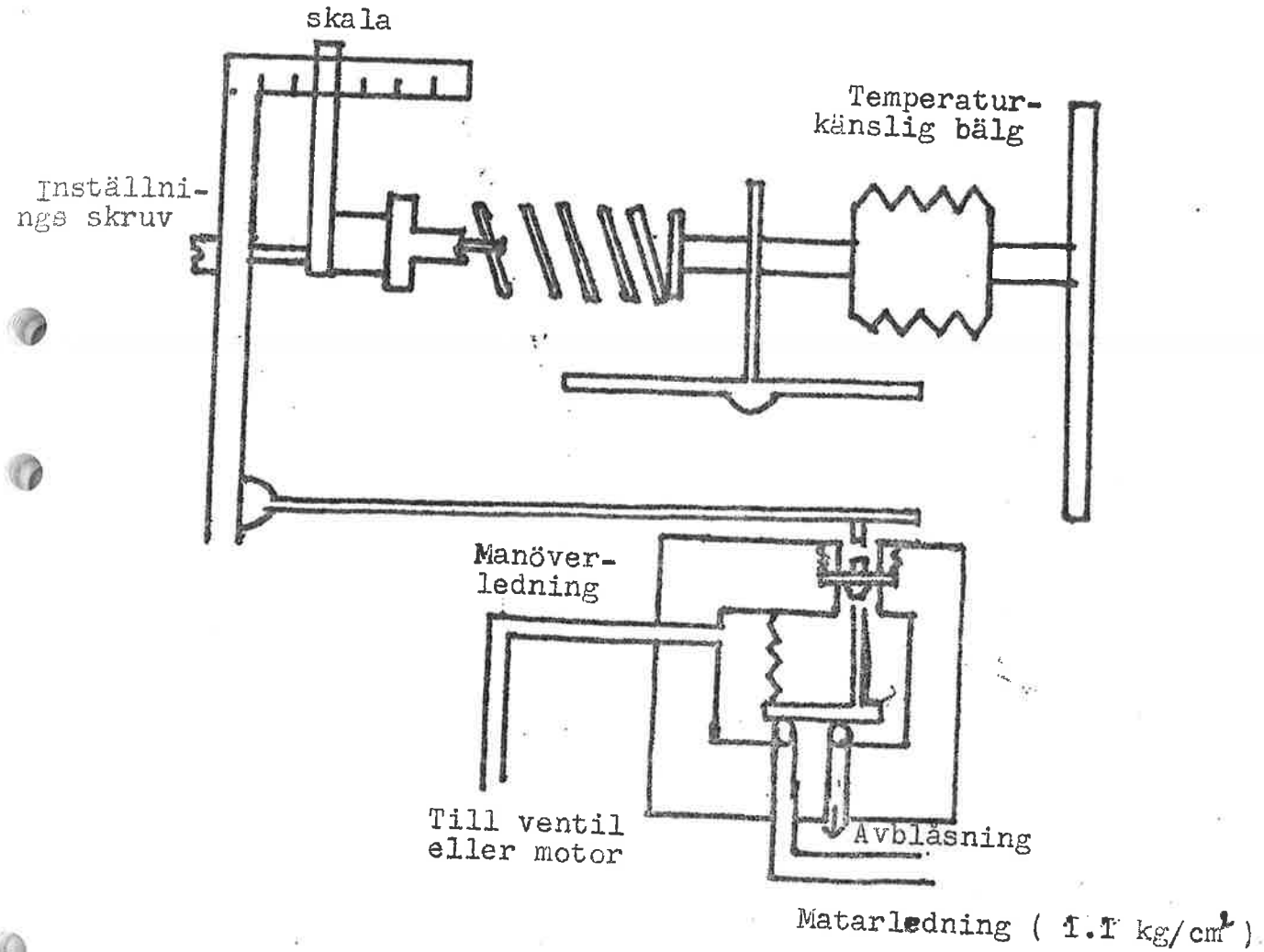
Hetvatten (ca.60°C) kommer in via rör 1 och passerar värmeväxlaren (batteriet) och avger där värme till den luft som sugs in utifrån, då man i föreläsningssalen vrider på ratten till en timer, som öppnar spjället och startar fläkten. Inblåsningsluftens temperatur precis efter fläkten kan avläsas på termometer T_1. Det vatten som avgett värme i batteriet lämnar detta genom rör 2. Flödet av hetvatten och vatten som avgett värme till inblåsluften regleras av shuntventilen A. Denna styrs pneumatisk av en i källarkorridor befintlig P-regulator, på vilken man ställer in lämpligt börvärde, och som medelst en i lufttrumman instickande bulb avkänner temperaturen på den luft som blåses ut från salen. En minskning av börvärdet på P-regulatorn medför en trycksänkning i den luftledning som förbinder regulatorn med shuntventilen A, vilken släpper in mer av det till ventilen från vänster inkommande hetvattnet, samtidigt som den minskar genomsläppet av det till ventilen herifrån kommande vattnet. Vid en ökning av börvärdet blir förloppet det motsatta.


Luftinsug
luft
T1
FLÄKT
VA-12
hörsal 0127
filter
spjällreg.
elpneumatiskt
relä
Nettvatten
A
Denna v
konstant
avstäng

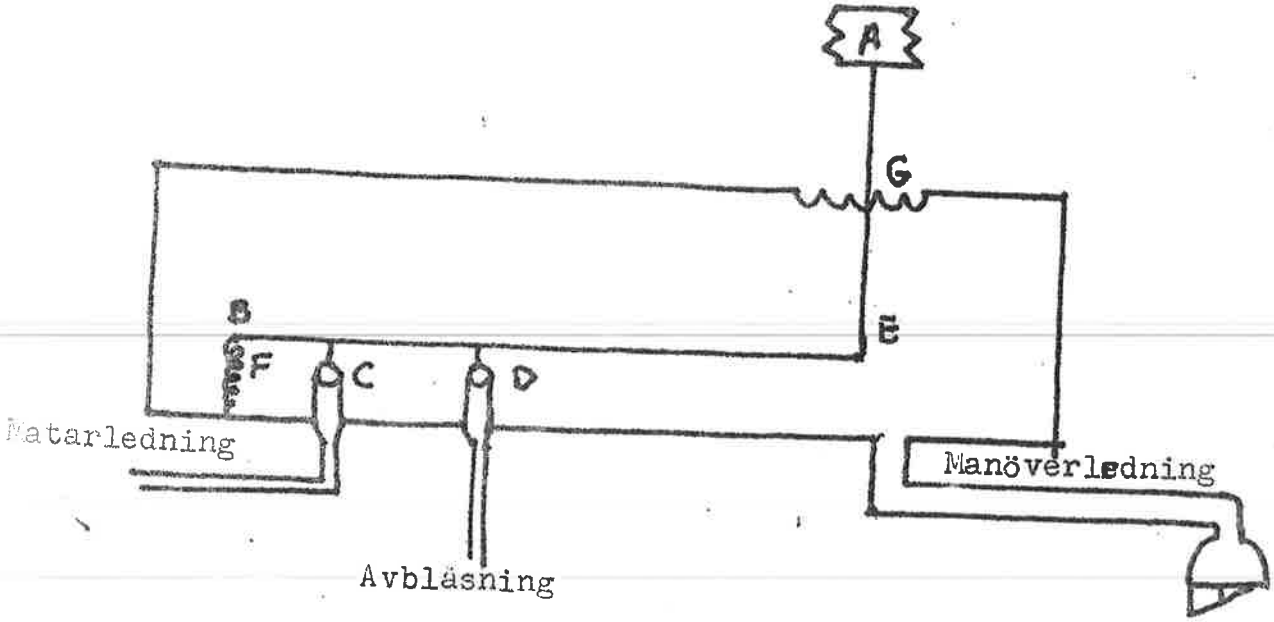
Figur 2.1

3. Beskrivning av regulatorn

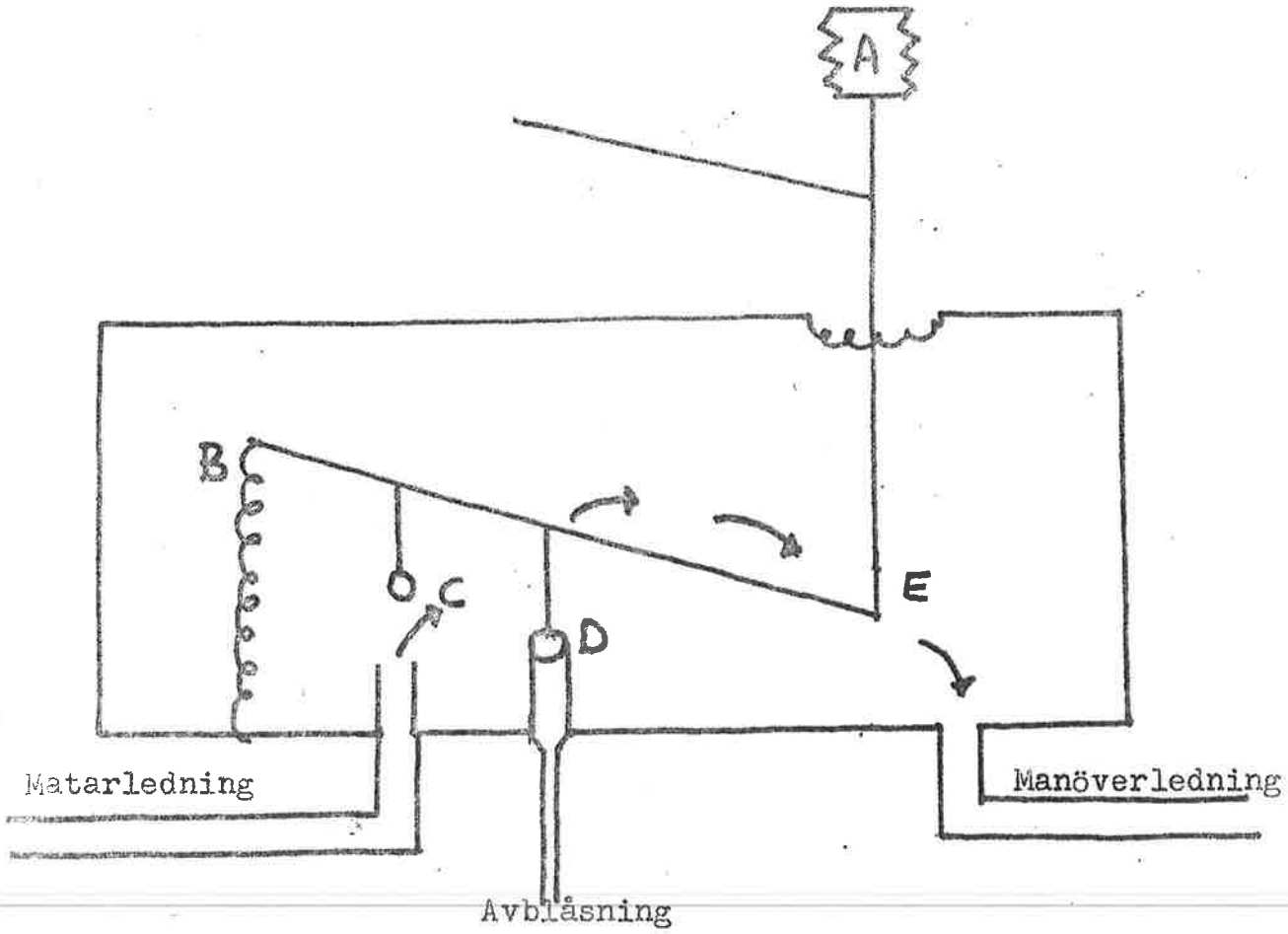
Termostatens arbetssätt



Vi gör en förenkling av schemat och betraktar termostaten i jämvikt.

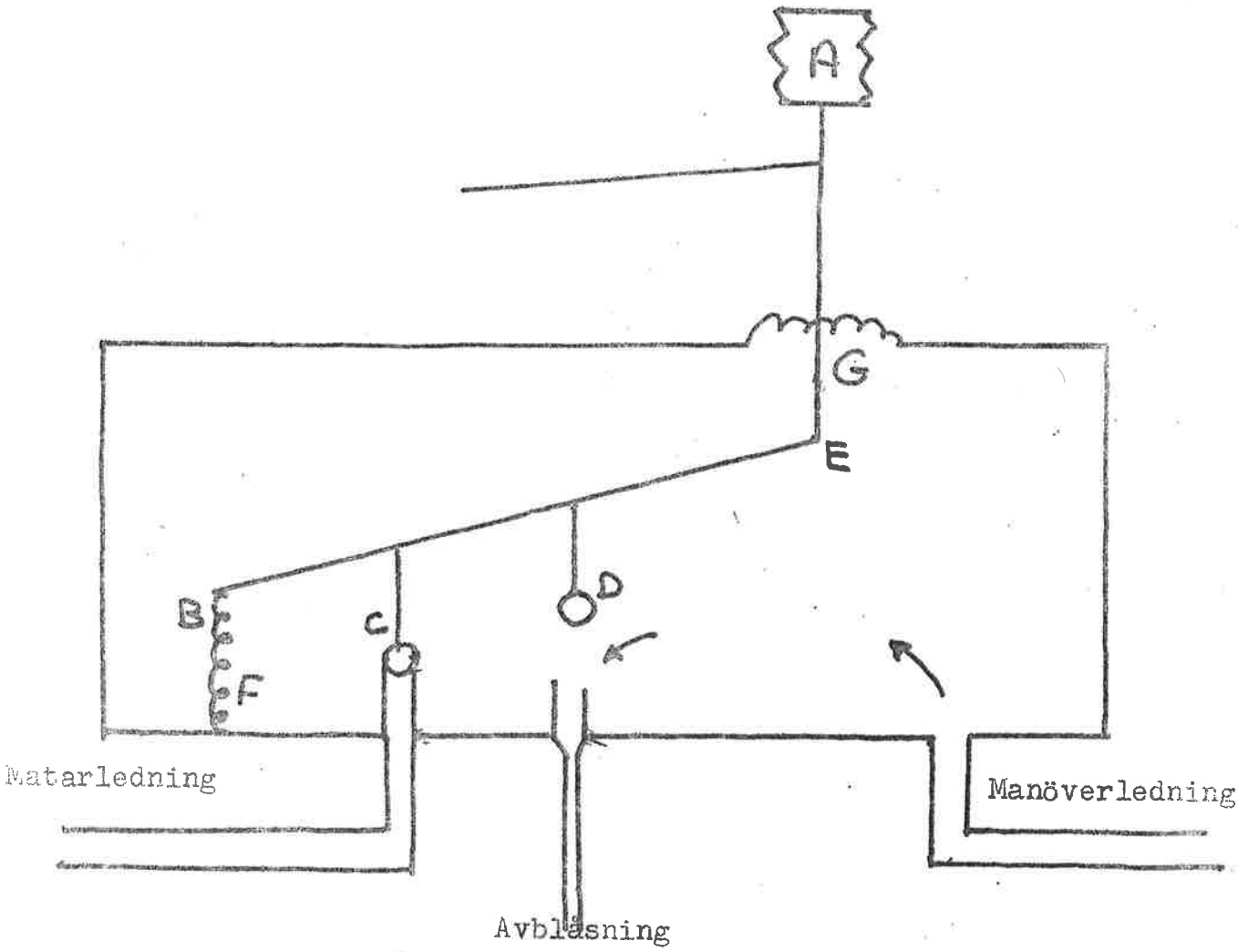


Antag nu att en temperaturökning äger rum. Bälgen A expanderar och påverkar via membranet G hävarmen B-E. Avblåsningsventilen D blir vridningsaxel för B-E och ventilen C öppnas. Tryckluften från matarledningen insläpps i kammaren och trycket i såväl kammaren som i manöverledningen ökas. Det ökade trycket i kammaren motarbetar bälgens tryck på membranet G vilket återgår till utgångsläge. Hävarmen B-E återställs samtidigt och ventilen C stängs.



Termostaten vid stigande temperatur

Antag nu att temperaturen sjunker.
Ventilen C blir nu vridningsaxel och ventilen D öppnas.
Trycket i manöverledningen och kammaren avblåses tills balanserat läge åter inträtt och ventilerna C och D åter stängts.



Termostaten vid fallande temperatur

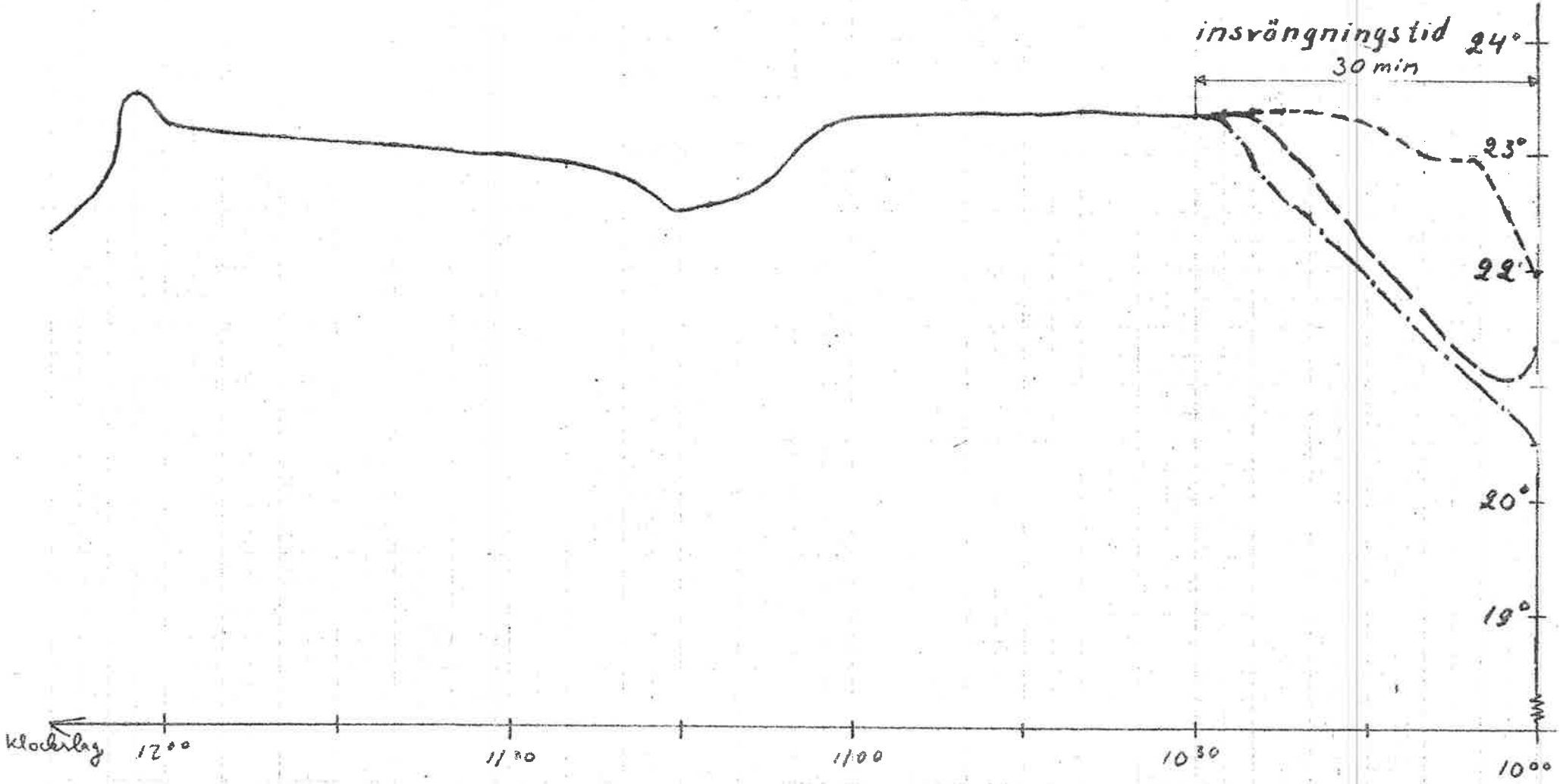
4. Experiment med resultat.

Försök 1 Se diag. 4.1

Klockan 10.00 sattes fläkten på. Före 10.00 hade inte fläkten varit på, och i salen hade det endast vistats några personer. Mellan 10.00 och 10.15 kommer det in teknologer, och kl. 10.15 börjar föreläsningen, då finns det omkring 150 st. i salen.
Klockan 10.30 har en homogen temperatur uppnåtts i salen. Vi fick ingen mätbar temperaturskillnad mellan, de på olika höjd liggande, mätpunkterna. Detta måste förklaras med att den luftströmning som teknologernas närvaro gav genom andning och kroppsrörelser utjämna temperatuteren.
Klockan 11.02 började rasten och teknologerna strömmade ut. Temperaturen sjönk 6.8° under den 15 min. långa rasten.
Under den följande föreläsningen ökade temperaturen svagt, men nådde inte upp till samma värde som under den första föreläsningen. En förklaring kan vara att en del teknologer gått hem på rasten.
Klockan 12.00 stängdes fläkten av.

Teckenförklaring till diagrammen

— — — —	Betecknar temp i övre delen av salen. Värdet här är ett gott mått på den genomsnittliga temp för åhörarna.
— — — —	Temp i taket ovanför tavlorna vid luftströmmens inlopp i salen. Den registrerade temp torde kunna räknas som luftens genomsnittliga inloppstemp i salen
— · — · —	Temp en halvmeter från golvet vid föreläsaren


insvängningstid
30 min
24°
23°
22°
20°
19°
klockslag
12⁰⁰
11³⁰
11⁰⁰
10³⁰
10⁰⁰

Diag. 4.1

Försök 2 Se diag 4.2

Termostaten ställdes i detta försök på maximalt värde. Detta för att vi skulle få en uppfattning om tidskonstanterna för de öppna systemen fläkten respektive fläkt plus rum. Försöket utfördes utan tekniker i salen och utan avsiktliga störningar.
Temp vid luftens inflöde i taket steg snabbt och nådde efter 10 min ett maxvärde, som antingen berodde på ett begränsat effektflöde i fläktsystemet eller på att regleringen arbetade. Troligen det senare.
Temperaturen i övre delen av salen steg långsammare än i taket och ett konstant värde 14 min efter fläktens påslagning.
Golvtemperaturen vid första bänkraden steg mycket långsamt. Detta torde bero på golvdrag från förberedelserummet. Detta antagande styrks av gropen i kurvan i andra delen av försöket. Försöksledaren gick då in till skrivaren i förberedelserummet, och kyla strömmade in. Klockan 17.39 stängdes fläkten av. Temp i taket sjönk då snabbt ned och anslöt sig till kurvan för temp i bakre övre delen av salen. 10 min efter att fläkten stängts av, var temp i salen nere på ett konstant värde.

Teckenförklaringen till diagram 4.2 är samma som för diagram 4.1, utom för temp vid föreläsaren. Denna givare flyttades till luftutsuget under första bänkraden

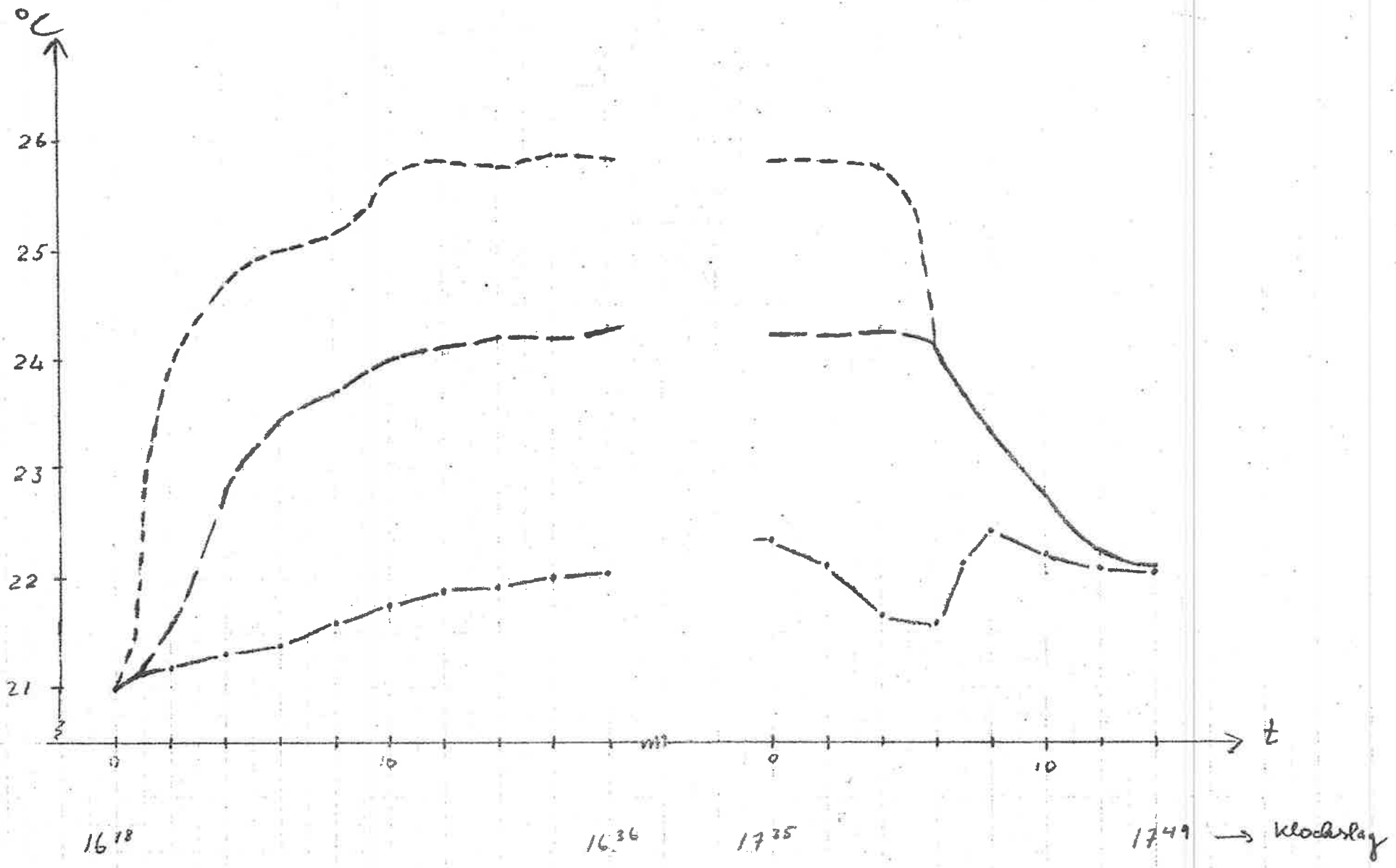


Diagram 4.2

5. Modell för rummet.

Det undersökta rummets dimensioner och geometri framgår av figur 5.1 och figur 5.2.

Fig. 5.1

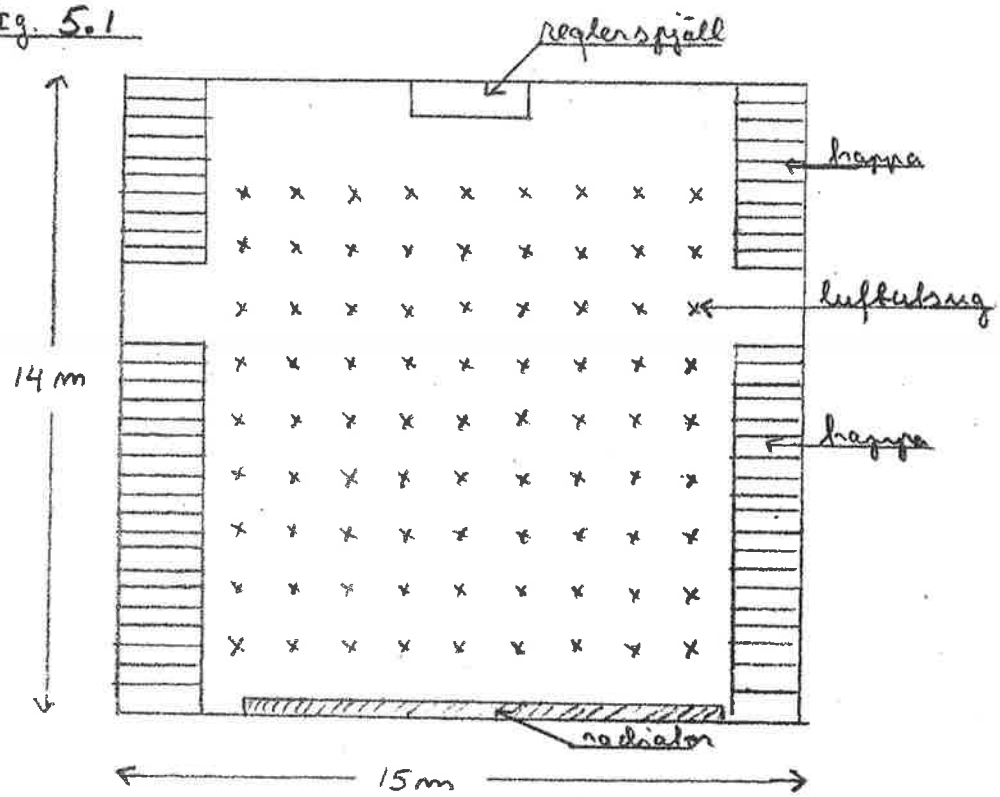
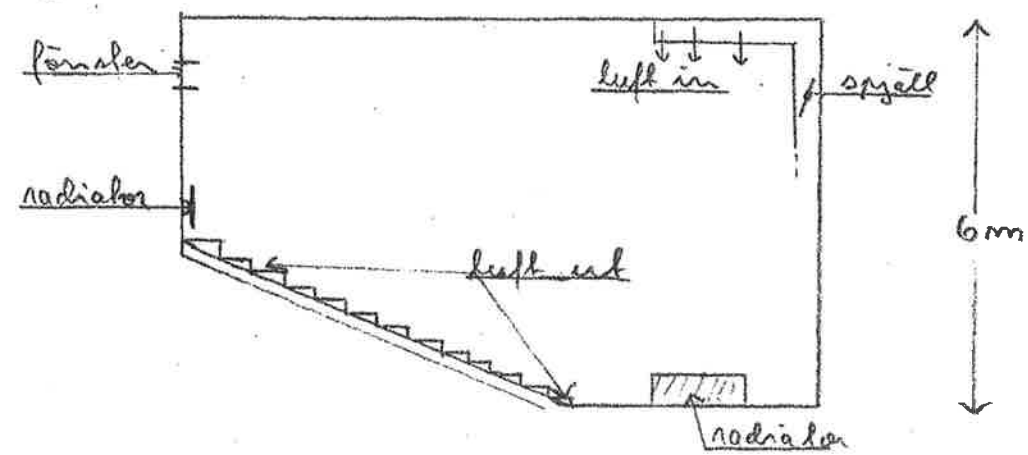


Fig. 5.2



Modell för rummets öppna system.

Vid konstruktion av värmeekvationer för rummet borde man använda den fundamentala $T = \frac{c}{k}\frac{\partial T}{\partial t}$

där T är temperaturen; c är specifika värmet/volymsenhet; k är specifika värmeledningsförmågan (förutsättes vara konstant). Problemet är då ett randvärdesproblem med rummet V och randytor S, samt $T = T(s,t)$ utom i de punkter där inblås och utblås sker. Där är värmeströmmen i i normalriktningen känd $\vec{i}\cdot\hat{n} = -k\frac{\partial T}{\partial n}$, då denna ekvation erhålles ur ekvationen för värmebatteriet. Därmed är problemet fullständigt lösbart, men problemen är uppenbara. Vid numerisk lösning skulle en differensekvation i fyra dimensioner behövas, där man delar upp rummet i större eller mindre homogena block.

Vi valde att dela upp rummet i ett block och använda den ekvation som ges [1] .

$$\frac{dx(t)}{dt} = -(N + \frac{Ah}{c})\, x(t) + N\cdot u1(t) + \frac{80}{c}\,(L + 0.5\cdot B) + \frac{Ah}{c}\,VAGG \quad (5.1)$$

där:

$x(t)$ = rumstemperaturen (°C)

N = antalet luftväxlingar per tidsenheter = 8,1 h^{-1}

A = totala arean av väggar, tak och golv = 540 m^2

h = värmeövergångstal vägg-luft = 2,5 $W/m^2\,°C$

c = luftens värmekapacitans = 315 Wh/°C

u1 = inluftstemperaturen (°C)

L = antalet personer i rummet

B = antalet tända lampor

VAGG = väggens temperatur = 17°C

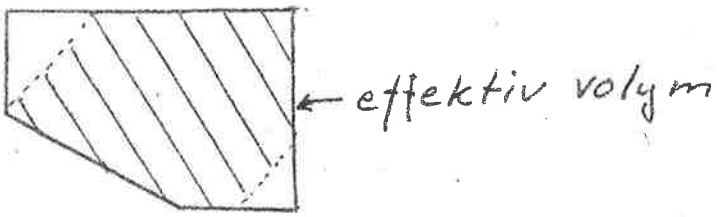
Kommentarer till modellen.

Modellen är naturligtvis en approximation av verkligheten. Vid uppställningen av ekvationen approximerades rummets temperaturförhållanden med en homogen temperatur. Dessutom sattes väggarnas värmekapacitivitet till 0, vilket är en grov approximation av verkliga förhållanden. Detta innebär att väggens temperatur är konstant oavsett om väggen absorberar eller avger värmeenergi till rummet.

I termen $\frac{Ah}{c}$ VAGG ingår även effekterna av radiatorer, fönster etc.

Beräkning och diskussion av modellens konstanter.

N: För det aktuella rummet är luftinblåsningen $W = 7300\ m^3/h$. När N beräknades antogs att all luft i rummet deltar i luftväxlingen. Rummets volym beräknades till $V = 900\ m^3$, vilket ger $N = W/V = 8{,}1\ h^{-1}$. Troligtvis är detta värde på N för lågt eftersom den effektiva luftväxlingsvolymen är mindre än V (se figur 5.3)



figur 5.3

h: då väggarna till största delen består av betong sattes värmeövergångstalet till $2.5\ W/m^2{}^\circ C$.

c: luftens värmekapacitivitet är cirka $0{,}35\ Wh/m^3{}^\circ C$ i det aktuella temperaturområdet, vilket ger $c = 0{,}35 \cdot V = 315\ Wh/^\circ C$.

L: om varje person ur värmesynpunkt approximeras med en 80 watt glödlampa blir tillskottet till ekvationen L·80/c.

B: lampornas effekt är 40 watt. Ekvationstillskottet analogt med L.

Karakterisering av systemet.

Rummet kan beskrivas på följande sätt (se även figur 7.1).

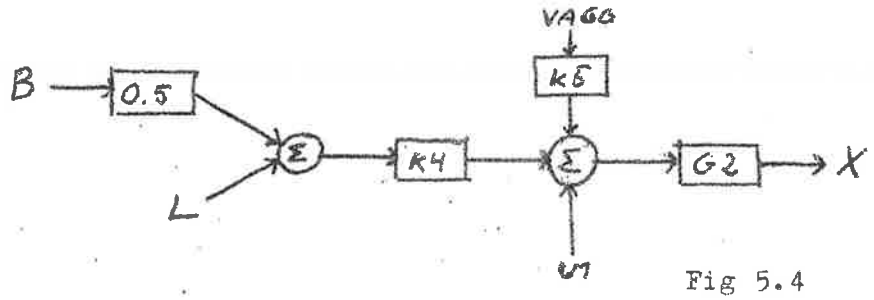


Fig 5.4

Ekvation 5.1 beskriver ett linjärt tidsinvariant dynamiskt system med flera insignaler och en utsignal.

Dess överföringsfunktion är $G2(s) = \frac{1}{sT+1}$ (beteckningar se figur 5.4).

$T = \frac{c}{Nc+Ah} = 0{,}081\ h = 4{,}8\ min.$

$k3 = N \cdot T = 0{,}65$

$k4 = (80/c) \cdot T = 0.021\,°C.$

6 Modell för värmebatteri

Värmebatteriet fungerar på så sätt att hett vatten strömmar genom en rörslinga som är placerad i lufttrumman. Härvid avges en värmemängd från vattnet till luften som är beroende av temperaturdifferensen mellan ingående och utgående vattenflöde genom batteriet. Närmare bestämt gäller följande:

$Q = \dot{m}\, C\, \Delta T$

där Q är värmeflödet från batteriet till luften

$\dot{m}$ är vattnets massflöde

C är värmekapacitiviteten för vattnet

$\Delta T = Th - Tl$ där Th är temperaturen hos vattnet in i batteriet och Tl är temperaturen hos vattnet ut.

Det som är intressant för modellen är den effekt som vi för in i systemet via batteriet $u^1(t)$ och temperaturen hos den inkommande luften $u2(t)$. Utsignaler blir temperaturen hos luften efter batteriet $x2(t)$ och temperaturen hos ytan på batteriet $x^1(t)$. För oss är emellertid $x^1(t)$ ointressant Värmen överförs till luften direkt från rörslingan och indirekt genom att batteriets väggar uppvärms genom strålning. Vi får två kopplade differentialekvationer en för $x^1(t)$ och en för $x2(t)$ där vi gjort det antagandet att temperaturen inne i batteriet är samma som efter batteriet.

Värmebalansekvationen är följande:

$$C1\ dx1(t)/dt = k12\ (\ x2(t) - x1(t)\ ) + u1(t) \qquad (6.1)$$

$$C2\ dx2(t)/dt = k12\ (\ x1(t) - x2(t)\ ) + q\ (u2(t) - x2(t)) \qquad (6.2)$$

med följande data

C1 = 5400 J/K

C2 = 260 J/K

k12= 18.1 W/K

q = 2600 W/K

Redovisning av data följer i slutet av detta avsnitt.

Vi finner att värmekapacitansen för luft (C2) är liten jämfört med värmekapacitansen hos själva batteriet (C1). Om C2 försummas och x1(t) löses ut ur ekv. (6.2) får vi

$$x1(t) = ((k12 + q)\ x2(t) - q\ u2(t))/k12 \qquad (6.3)$$

och derivering ger

$$dx1(t)/dt = ((k12+q)\ dx2(t)/dt - q\ du2(t)/dt)/k12 \qquad (6.4)$$

Insättning av (6.3) och (6.4) i (6.1) ger:

$$C1((k12+q)\ dx2(t)/dt - q\ du2(t)/dt)/k12 =$$

$$= k12\ x2(t) - (k12+q)\ x2(t) + q\ u2(t) + u1(t)$$

inför $a = k12\ q/(k12+q)$ så blir ekvationen

$$dx2(t)/dt = -a\ x2(t)/C1 + a\ u2(t)/C1 + a\ du2(t)/dt\ /k12 +$$

$$+ a\ u1(t)\ /\ q\ C1$$

u2(t) är den inkommande luftens temperatur och i vårt fall sättes du2(t)/dt = 0 varvid den slutgiltiga ekvationen blir

$$dx2(t)/dt = -\ a\ x2(t)/C1 + a\ u1(t)/(qC1) + a\ u2(t)/C1 \qquad (6.5)$$

Laplacetransformering av (6.5) ger

$$(s + a/C1)\ X2(s) = a/(q\ C1)\ U1(s) + a/C1\ U2(s)$$

överföringsfunktionerna blir då

$$G1(s) = 1/(q(C1/a\ s+1))$$

$$G2(s) = 1/(C1/a\ s + 1)$$

där G1 gäller X2/U1 och G2 gäller X2/U2

Härur fås de statiska förstärkningarna K1 resp K2 samt tidskonstanten som

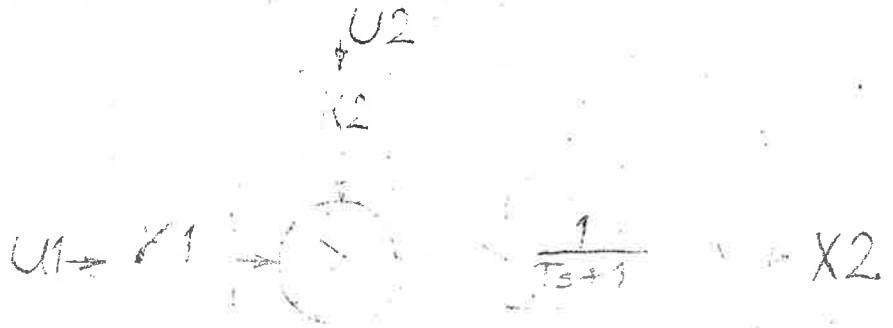
$$K1 = 1/q = 3.8\ 10^{-4}\ K/W$$

$$K2 = 1.0\ K/W$$

$$T = C1/a = 300\ s$$

där $a = k12\ q/(k12 + q) = 18.0\ W/K$

Vår modell blir alltså följande



Data för värmebatteriet

Fabrikat Svenska Fläktfabriken

Batteriets väggar

area	0.75	m^2
tjocklek	2	mm
densitet	7800	kg/m^3
värmekapacitet	460	J/kg K
värmekapacitans	5400	J/K

Bidraget till värmekapacitansen från röret försummas.

Totala värmekapacitansen C1=5400 J/K

Luft i batteriet

volym	0.2	m^3
densitet	1.29	kg/m^3
värmekapacitivitet	1000	J/kg K
värmekapacitans	260	J/K

C2 = 260 J/K

Luftflöde

flöde	7300	m^3h
densitet	1.29	kg/m^3
värmekapacitivitet	1000	J/kg K

c = 2600 W/K

Totala värmeöverföringskoefficienten kl2 varierar vid påtvingad konvektion och har här satts till 18.1 W/K.

Kommentar: Det värmebatteri som värmer upp luften till sal M:A är av äldre datum, vilket innebär att Högskolans fastighetstjänst ej kan bidra med en beskrivning av detta batteri. Ovanstående data är därför till viss del hämtade ur egna mätningar.

7 MODELL FÖR SYSTEMET

Det öppna systemet kan beskrivas på följande sätt:

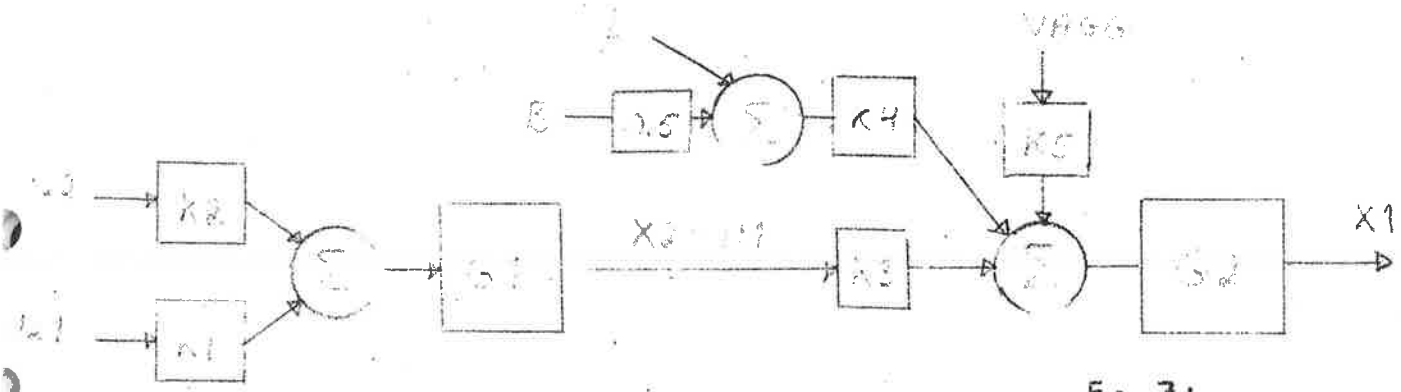


Fig 7.1

där $G1(s) = \dfrac{1}{T_1 s + 1}$, $T_1 = \dfrac{C}{a} = 300$ s

$G2(s) = \dfrac{1}{T_2 s + 1}$, $T_2 = \dfrac{C}{nC + Ah} = 291$ s

$K1 = \dfrac{1}{q} = 3.8\ 10^{-4}$ °C/W

$K2 = 1.0$

$K3 = \dfrac{nC}{nC + Ah} = 0.65$

$K4 = \dfrac{80}{nC + Ah} = 0.02$ °C

$K5 = \dfrac{Ah}{nC + Ah} = 0.35$

insignaler och utsignaler är följande

U21 värmeeffekt från batteriet till luften

U22 temperaturen hos den inkommande luften

X2 = U1 uttemperatur från batteri = intemperatur till salen

L antalet personer i salen

B	antalet tända lampor
VAGG	väggarnas temperatur
X1	temperatur i salen

Reglering av systemet.

I verkligheten har vi en återkoppling från temperaturen hos luften som lämnar salen. Denna temperatur jämförs med en referenstemperatur som vi själva kan ställa in.

Temperaturdifferansen styr sedan den värmemängd som lämnar batteriet. Detta beskrivs utförligare i kapitel 2.

I princip har vi alltså en återkopplingslänk från rumstemperaturen X1 till batteriets avlämnade värmeeffekt U21. Med en proportionell regulator kan detta tecknas på följande sätt:

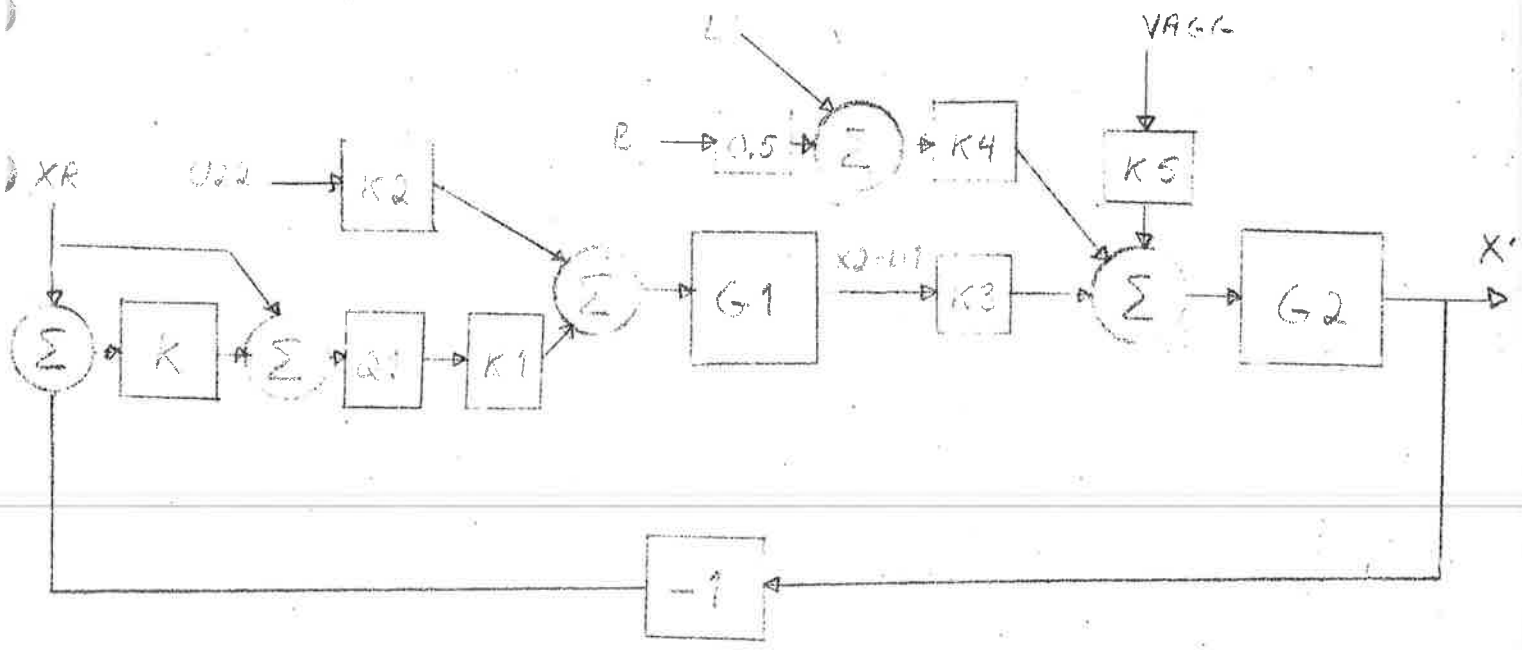
$$U21 = K \cdot Q1 \cdot (XR - X1) + Q1 \cdot XR$$

där Q1 är det effekttillskott vi får stationärt om referenstemperaturen ökas med 1°C.

Vi har Q1 = 2000 W/°C

K är förstärkningskoefficienten hos P-regulatorn.

Det slutna systemet ser då ut på följande sätt:



8 SIMULERING AV SYSTEMET

Vårt system består av två differentialekvationer, en för värmebatteriet (6.5) och en för rummet (5.1). Dessa är sammankopplade på så sätt att utsignalen från batteriet är insignal till rummet.

Simuleringen gjordes för att se om vår matematiska modell var en rimlig beskrivning av verkligheten, och då vi tyckte att så var fallet undersökte vi hur systemet reagerade på ändrade insignaler och för olika K-värden hos regulatorn. Resultaten finns redovisade i diagram 1 och 2.
För simuleringen utnyttjade vi institutionens PDP med programmet skrivet i SIMNON. Programmet finns redovisat sist i detta avsnitt.
Här följer några kommentarer till programmet.
Programmet är uppdelat i tre underprogram nämligen CONTINUOS SYSTEM RUM som beskriver ekvationen för rummet (5.1), CONTINUOS SYSTEM BATT som beskriver ekvationen för värmebatteriet (6.5) samt CONNECTING SYSTEM SALMA som knyter ihop de två tidigare programmen genom att definiera de parametrar i dessa program som man har deklarerat som INPUT.
När vi simulerar att fläkten är avstängd sätter vi K=0 ty då blir N=0 genom satsen
N[RUM] = IF K< 0.1 THEN 0 ELSE NIN
N är antalet luftväxlingar per timme.

Jämförelse mellan teori och verklighet.
Vi kan jämföra fallet när 150 elever kommer in i salen. Från modellen får vi insvängningstiden 19 min taget ur diagram 2 kapitel 8. Från mätningar gjorda på motsvarande situation fick vi insvängningstiden 30 min ur diagram 1 kapitel 4 om vi ser på den övre kurvan dvs. den som motsvarar temperaturen i taket. Om utseendet i övrigt jämförs ser vi att överslängen är större i modellen än i verkligheten.

Slutsats: Modellen är en hygglig beskrivning av verkligheten. Med en justering av parametrarna i ekvationen för regulatorn kan överensstämmelsen bli bättre.

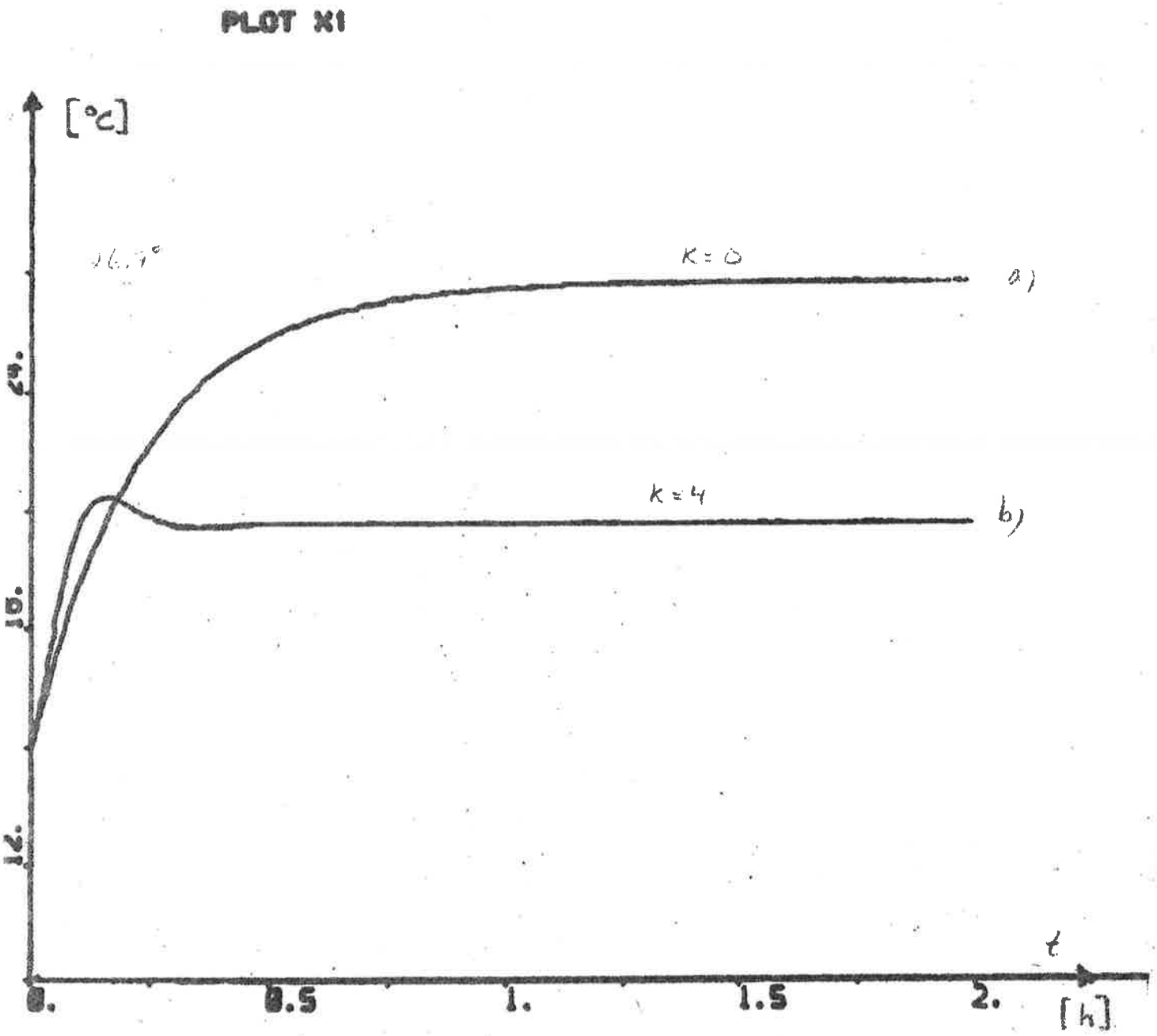


diagram 1

a) Här visas hur temperaturen stiger från ett begynnelsevärde på 15°C när det vid t=0 kommer 150 elever in och 30 lampor tänds under förutsättning att fläkten är avstängd. Väggarnas temperatur på 17°C hjälper till att dra upp temperaturen.

b) Vid t=0 kommer 150 elever in och 30 lampor tänds. Fläkten är på. Vi har valt K=4 och satt XR=20. Vi ser att vi får ett stationärt fel på 0.7°C.

X1 är temperaturen i salen.

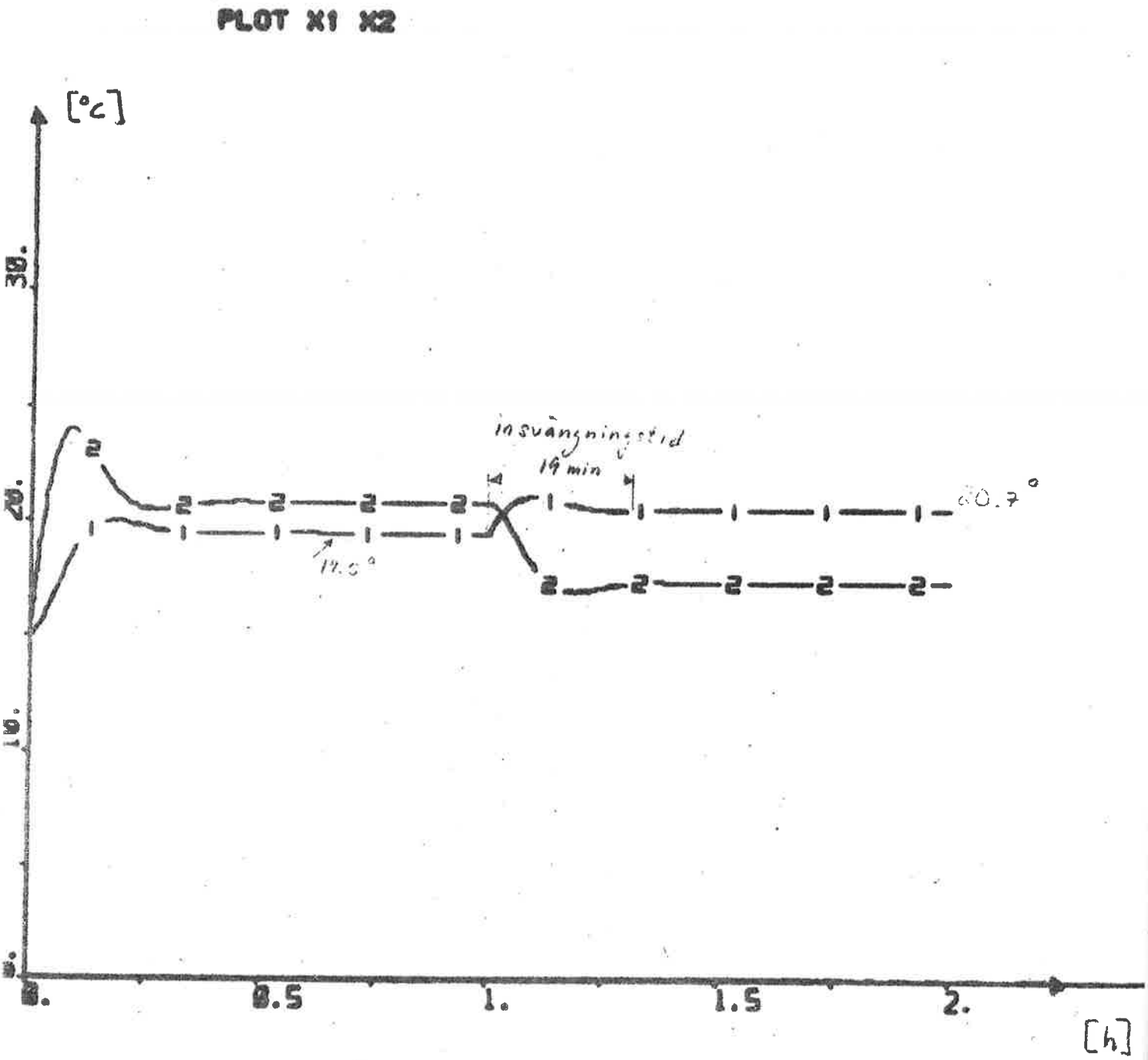


diagram 2

Utgående från en begynnelsetemperatur på 15°C hos både X1 och X2 har vi simulerat hur temperaturen ändras i en tom sal under 1:a timmen. Efter 1 timme kommer sedan 150 elever in i salen och 30 lampor tänds. Vi har K=4 och XR=20.

X2 är uttemperatur från batteri = intemperatur till salen.

```
CONTINUOUS SYSTEM RUM
STATE X1
DER DX1
INPUT U1 L B N
OUTPUT X

INITIAL
A:540
C:315
V:900
H:2.5
VAGG:17

OUTPUT
X=X1

DYNAMICS
DX1=-(N+A*H/C)*X1+N*U1+80*(L+0.5*B)/C+A*H*VAGG/C

END
```

- -

```
CONTINUOUS SYSTEM BATT
STATE X2
DER DX2
INPUT U21 U22
OUTPUT XX

INITIAL
AA:18
C1:1.5
Q:2600

OUTPUT
XX=X2

DYNAMICS
DX2=-AA/C1*X2+AA/C1*U22+AA/C1/Q*U21
END
```

- -

```
CONNECTING SYSTEM SALMA
TIME T
K:5
XR:25
INL:4
U21[BATT]=K*Q1*(XR-X[RUM])+Q1*XR.
Q1:2000
U22[BATT]=INL
U1[RUM]=XX[BATT]
LIN:150
BIN:15
NIN:8.1
N[RUM]=IF K<0.1 THEN 0 ELSE NIN
L[RUM]=LIN
B[RUM]=BIN
END
```

9. Slutord.

Vissa kommentarer till undersökningen kan göras. Vi har inte tillräckligt med experimentella resultat för att modellen skall kunna styrkas. Detta i sin tur beror på rent praktiska problem som dålig utrustning, svårigheter att få tillträde till lokaler osv.

Vi upplevde även svårigheter med att få åtta individer att fungera som grupp, vilket till stor del berodde på att hitta gemensamma lediga tider.

Vad gäller temperaturregleringen i M:A kan sägas att den visade sig fungera tillfredsställande om den väl kopplas in. Råd till alla föreläsare: Sätt på fläkten.

10. Referenser

Elmquist H : Simnon, Report 7502

Jensen Lars : Dynamic models for heated airtemperature to roomairtemperature, Report 7412 (1)

Åström Karl-Johan : Reglerteori