

EXPERIMENTELL UNDERSÖKNING AV DYNAMIKEN

HOS VÄRMELEDNING I EN KOPPARSTAV

ANDERS ECK

EXPERIMENTELL UNDERSÖKNING AV DYNAMIKEN HOS VÄRMELEDNINGEN

I EN KOPPARSTAV

Examensarbete i reglerteknik

av

Anders Eck

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid.nr.
KAPITEL 1 - INLEDNING	1
1. Målsättning	
2. Apparatur	
KAPITEL 2 - KÖRNING AV LABORATION 2 AK REGLERTEKNIK, PÅ ANALOGIMASKIN	9
KAPITEL 3 - INSTÄLLNING AV PI-REGULATOR FÖR TEMPERATURSTEGSSERVOT	11
KAPITEL 4 - UNDERSÖKNING AV LÄMPLIG REFERENSTEMPERATUR, SAMT LÄMPLIG STORLEK PÅ INSIGNALENS AMPLITUD	15
KAPITEL 5 - STEGSVARSANALYS PÅ ÖPPNA SYSTEMET	19
KAPITEL 6 - ÅTERKOPPLING FRÅN STAVENS MITTPUNKT	28
KAPITEL 7 - STÖRNINGSINVERKAN PÅ STAVENS MITTPUNKT VID ÅTERKOPPLING	50
KAPITEL 8 - SAMMANFATTNING	52
KAPITEL 9 - REFERENSER	54

## 1. INLEDNING

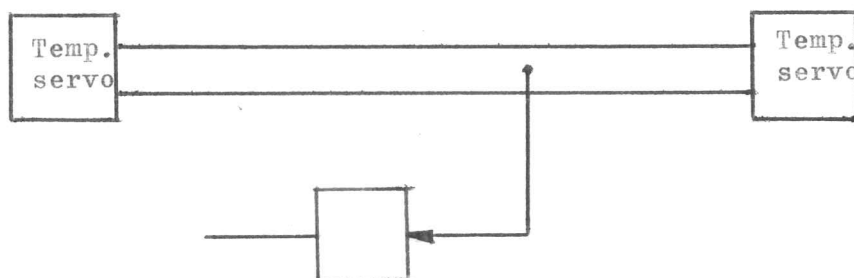
### 1.1 Målsättning

I sitt examensarbete i reglerteknik HT-66, "Studium av system för temperaturreglering" har B. Ekstrand och L-E Larsson studerat den endimensionella värmeprocess som uppträder vid värmeutbredning i en rak isolerad metallstav. Deras resultat har legat till grund för utarbetandet av lab. 2 "Temperaturreglering" AK, reglerteknik. Detta arbetes syfte är huvudsakligen att via mätningar verifiera den matematiska modellen för staven, samt undersöka inverkan av återkopplingar från olika punkter på staven, i anslutning till de simuleringar av systemekvationerna på analogmaskin som utförts enligt ovannämnda laboration.

De beteckningar som här kommer att användas överensstämmer huvudsakligen med dem i laborationen. Vidare kommer här de teoretiska beräkningarna på värmestaven att utelämnas, varför kännedom om ovannämnda examensarbete och laboration är nödvändigt för sammanhanget.

### 1.2 Apparatur

Värmestaven kan schematiskt beskrivas enligt följande figur:



Temperaturservona vid stavens båda ändpunkter är identiska. De är av fabrikat Siemens, typ PKE 36 E 0460, och består vardera av två stycken Peltierelement, vilka omges av en vattenvärmeväxlare. De båda Peltierelementen ligger an mot vardera sidan

av en metallplatta, vilken i sin tur är fastlödd vid värmestaven. Det är viktigt att observera att det mellan metallplattan och vardera Peltierelementet måste anbringas en tunn glimmerplatta, för att här undvika elektrisk kontakt. Glimmerplattan insmörjes i en lämplig typ av olja (ex. silikonolja) för att öka värmeutbytet. Staven har isolerats från omgivningen med isoleringsmaterial av typ Gullfiber. Som mätningarna så småningom skall visa, är kravet på en ordentlig isolering av avgörande betydelse för resultatet.

Vad styrenheten för temperaturservona beträffar, är denna ännu inte fribyggd, utan styrningen sker från analogmaskin, via en spänningsförstärkare, konstruerad av FOA.

Ytterligare uppgifter om temperaturservona kan erhållas från exempelvis Ekstrand-Larssons examensarbete, kapitel 4, eller från Siemens specialkatalog över Peltierelement och kylare.

#### Termistorer

Som möjliga typer av temperaturgivare kan man tänka sig motståndstermometer, termoelement eller termistor. De båda första har den bästa lineariteten, medan däremot termistorns utspänning är lättast att förstärka upp. Genom att arbeta inom begränsat temperaturområde kan emellertid olägenheterna med termistorns olinearitet tillfredsställande reduceras, varför denna typ av temperaturgivare valts.

För mätningarna har valts termistorer av fabrikat Hafo, typ N. För dessa gäller att resistansens temperaturberoende med god approximation kan skrivas:

$$R = A \cdot e^{B/T}$$

där R betecknar resistansen, T är absolut temperatur, A och B konstanter, samt e basen i det naturliga logaritmsystemet. För att bekvämt kunna arbeta med dessa termistorer är det nödvändigt att söka skaffa sig en så lineär karakteristik som möjligt. Det bör observeras att man med tämligen enkla medel

kan bygga en "lineariseringskrets", vars karakteristik med god noggrannhet är linjär inom ett begränsat temperaturintervall. Se R.W.Haruff, Yellow Springs Instrument Co: "Linear temperature scales from thermistor sensors". Vid dessa mätningar har emellertid använts en enklare metod, nämligen att inom ett givet temperaturintervall direkt söka anpassa en rät linje till termistorkarakteristiken.

De vid försöken använda termistorerna har numrerats från 1 till 5. Samtliga termistorer har kalibrerats i oljebad vid tre olika temperaturer. De uppmätta värdena framgår av sid. 4. För samtliga termistorer har plottas resistansen i logaritmisk skala, som funktion av temperaturen (diagram 1.2.1-1.2.5). Vi får i enlighet med teorin rätta linjer.

#### Linearisering av termistorernas karakteristik

Som senare mätningar skall visa, är det gynnsammast att arbeta med en arbetstemperatur (svarande mot temperaturen 0 vid simulering på analogmaskin) på 24 °C, och ett temperatursteg på 5 °C. Vi skall således linearisera inom intervallet 24-29 °C.

#### Metod 1

Enligt denna metod har termistorerna 1 och 2 lineariserats.

Metoden baserar sig på följande:

1. Upprita med utgångspunkt från resp. diagram 1.2.1 och 1.2.2 temperaturen som funktion av resistansen, nu i linjär skala. (diagram 1.2.1.A och 1.2.2.A)

2. Linearisera de under punkt 1 erhållna diagrammen.

Lineariseringen har gjorts med hjälp av "minsta kvadratmetoden", baserad på fem mätpunkter. Se Carl-Erik Fröberg: "Lärobok i numerisk analys"

Uppmätta termistorresistanser vid tre olika temperaturer  
(likström)

termistor nr: 1		termistor nr: 2	
temp.(°C)	resist.( $\Omega$ )	temp.(°C)	resist.( $\Omega$ )
21.8	2165	22.6	2120
34.9	1360	39.7	1142
56.0	673.2	55.0	661.7
termistor nr:3		termistor nr: 4	
temp.(°C)	resist.( $\Omega$ )	temp.(°C)	resist.( $\Omega$ )
21.7	2090	21.7	2185
39.3	1138	40.2	1122
55.0	664.2	55.0	669.1
termistor nr: 5			
temp.(°C)	resist.( $\Omega$ )		
22.7	2133		
36.4	1300		
48.1	851		

Linearisering av termistor 1 och 2 enligt metod 1.

termistor 1

Ur diagram 1.2.1.A fås:

t(°C)	resist.( $\Omega$ )
24.00	1988
25.25	1905
26.50	1825
27.75	1749
29.00	1677

"minsta kvadratmetoden" ger:

$$t = - 1.604 \cdot 10^{-2} R + 55.83$$

där t mäts i °C och R i  $\Omega$ .

Ur ovanstående ekvation beräknas:

$$t = 24 \text{ } ^\circ\text{C ger } R = 1984 \Omega.$$

$$t = 29 \text{ } ^\circ\text{C ger } R = 1673 \Omega.$$

Således:

$$\Delta t = 5 \text{ } ^\circ\text{C ger } \Delta R = - 311 \Omega.$$

termistor 2

Ur diagram 1.2.2.A fås:

t(°C)	resist.( $\Omega$ )
24.00	2046
25.25	1953
26.50	1866
27.75	1783
29.00	1702

"minsta kvadratmetoden" ger:

$$t = - 1.455 \cdot 10^{-2} R + 53.70$$

där t mäts i °C och R i  $\Omega$ .

Ur ovanstående ekvation beräknas:

$$t = 24 \text{ } ^\circ\text{C ger } R = 2042 \Omega.$$

$$t = 29 \text{ } ^\circ\text{C ger } R = 1698 \Omega.$$

Således:

$$\Delta t = 5 \text{ } ^\circ\text{C ger } \Delta R = - 344 \Omega.$$



Linearisering enligt metod 1 har vid senare mätningar visat sig mindre lämplig av två orsaker.

1. Vid kalibreringen av termistorerna har resistansen uppmätts med fyra siffror. Vi förutsätter nu att inget fel föreligger i dessa värden. Vid uppritning av termistorkarakteristiken med resistansen (logaritmisk skala) som funktion av temperaturen kan resistansvärdena endast plottas med två säkra siffror. Vid avläsning av detta diagram är därför ett fel på  $\approx 20 \Omega$  högst rimligt. Dessutom tillkommer fel vid uppritningen av karakteristiken med resistansen (lineär skala) som funktion av temperaturen, vid lineariseringen av denna karakteristik, samt slutligen fel i temperaturvärdena.

Vid körning av exempelvis stegsvarsanalys på det öppna systemet, med ett temperatursteg på  $5^\circ\text{C}$ , får vi enligt lineariseringsmetod 1 en resistansändring på  $\approx 300 \Omega$ . Ett fel i resistansvärde på  $20 \Omega$ , ger således ett fel i temperatur på  $\approx 0.3^\circ\text{C}$ . Vid körning av stegsvarsanalys svarar  $5^\circ\text{C}$  mot 20 cm på pappret, d.v.s. felet svarar mot  $\approx 1.2$  cm.

2. Felet i punkt 1 uppträder naturligtvis också vid körning i begynnelse- och slutvärden, vilket ibland kan vara speciellt ogynnsamt. Detta fel kan emellertid helt elimineras med nedanstående lineariseringsmetod, under förutsättning att termistor-kalibreringen saknar fel.

### Metod 2

Enligt denna metod har termistorerna 3, 4 och 5 lineariserats. Termistor 1 har vid senare mätningar icke använts, då dess karakteristik enligt diagram 1.2.1 icke är helt linjär. Metoden baserar sig på följande:

Enligt tidigare gäller allmänt för termistorkarakteristiken:

$${}^{10}\log R = aT + b$$

där T mätes i absoluta grader, och R i  $\Omega$ .

Med hjälp av "minsta kvadratmetoden" beräknas konstanterna a och b direkt utifrån kalibreringsvärdena på sidan 4. Med hjälp av ovanstående ekvation fås sedan resistanserna vid  $24$  och  $29^\circ\text{C}$ .

Resultat:

termistor 3

$${}^{10}\log R = - 0.014965T + 7.73245$$

Ur ovanstående ekvation beräknas:

$$t = 24 \text{ }^{\circ}\text{C ger } T = 297.16 \text{ }^{\circ}\text{K och } R = 1930 \Omega .$$

$$t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C ger } T = 302.16 \text{ }^{\circ}\text{K och } R = 1625 \Omega .$$

Således:

$$\Delta t = 5 \text{ }^{\circ}\text{C ger } \Delta R = - 305 \Omega .$$

termistor 4

$${}^{10}\log R = - 0.015458T + 7.89647$$

Ur ovanstående ekvation beräknas:

$$t = 24 \text{ }^{\circ}\text{C ger } T = 297.16 \text{ }^{\circ}\text{K och } R = 2009 \Omega .$$

$$t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C ger } T = 302.16 \text{ }^{\circ}\text{K och } R = 1682 \Omega .$$

Således:

$$\Delta t = 5 \text{ }^{\circ}\text{C ger } \Delta R = - 327 \Omega .$$

termistor 5

$${}^{10}\log R = - 0.015705T + 7.97528$$

Ur ovanstående ekvation beräknas:

$$t = 24 \text{ }^{\circ}\text{C ger } T = 297.16 \text{ }^{\circ}\text{C och } R = 2035 \Omega .$$

$$t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C ger } T = 302.16 \text{ }^{\circ}\text{C och } R = 1698 \Omega .$$

Således:

$$\Delta t = 5 \text{ }^{\circ}\text{C ger } \Delta R = - 337 \Omega .$$

Nackdelen med metod 2 är, att lineariseringen endast sker utifrån två punkter, nämligen för  $t = 24$  och  $t = 29$  °C. Med tanke på att termistorkarakteristikorna inom ett så litet temperaturintervall som 5 °C tämligen väl ansluter sig till en rät linje, samt de stora felkällor som metod 1 är behäftad med, torde metod 2 vara att föredraga. Denna metod ger dessutom, som tidigare nämnts, rätt begynnelse- och slutvärden.

Slutligen skall framhållas, att vid användning av metod 2, är det naturligtvis bekvämast, att direkt kalibrera termistorerna vid  $t = 24$  och  $t = 29$  °C.

Ytterligare uppgifter om termistorer kan erhållas från exempelvis Ekstrand-Larssons examensarbete, eller från Hafo's broschyr "Termistorer".

## 2. KÖRNING AV LABORATION 2 AK REGLERTEKNIK, PÅ ANALOGIMASKIN

Detta moment har medtagits för att erhålla jämförelsematerial utifrån de teoretiskt beräknade resultaten på värmestaven. För teori och kopplingsschemata hänvisas till laborationen. Vid numrering av diagrammen, har laborationens numrering angetts inom parentes.

Vid dessa körningar har skrivarhastigheten varit 5 eller 10 s/cm. Utgående från den ursprungliga värmeledningsekvationen för staven, har emellertid tidsskalan snabbats upp med en faktor

$$\frac{l^2}{a^2} \cdot \frac{1}{\beta}, \text{ där}$$

$$a^2 = \frac{K}{\rho C}$$

K = stavmaterialets värmeledningstal

$\rho$  = stavmaterialets täthet

C = stavmaterialets specifika värme

l = stavens längd

$\beta$  = tidsskalfaktorn för systemekvationerna

Värmestaven är gjord av koppar.

Insättning av numeriska värden ger:

$$K = 3.8 \quad \text{W/cm} \cdot \text{grad}$$

$$\rho = 8.93 \quad \text{g/cm}^3$$

$$C = 0.39 \quad \text{J/g} \cdot \text{grad}$$

$$l = 30.15 \quad \text{cm}$$

$$\beta = 128$$

Härur fås:

$$\frac{l^2}{a^2} = 833.1 \text{ s} \quad \text{sam} \quad \frac{l^2}{a^2} \cdot \frac{1}{\beta} = 6.509 \text{ s}$$

De verkliga skrivarhastigheterna erhålles således genom att multiplicera med faktorn 6.509 s.

Detta ger:

5 s/cm svarar mot 32.54 s/cm.

10s/cm svarar mot 65.09 s/cm.

Med utgångspunkt från dessa värden, vore det naturligtvis lämpligast att tidsskala så, att skrivarhastigheterna blev 30 respektive 60 s/cm. Detta förbisågs emellertid, enär de teoretiska kurvorna kördes först.

Diagram

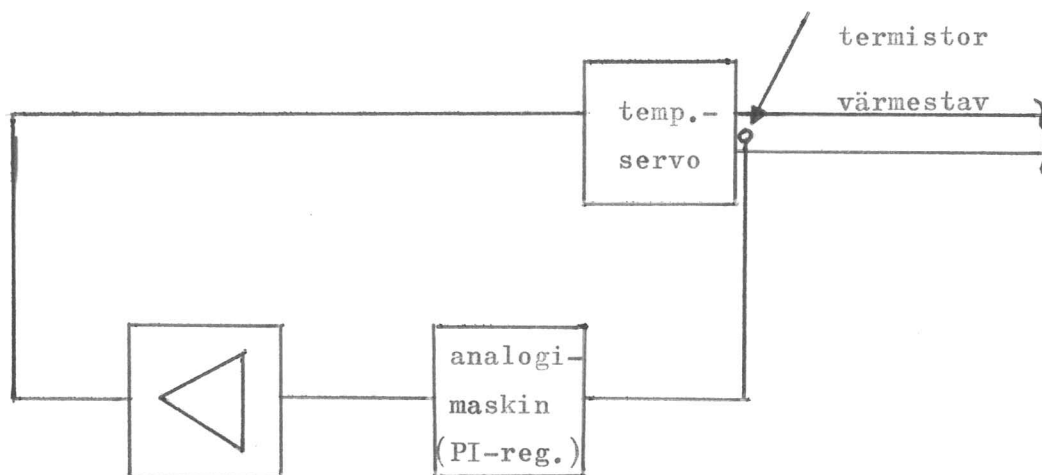
Diagram nr:

Stegsvar för det öppna systemet.	2.1 ( 1 )
Stegsvar i stavens mittpunkt vid proportionell återkoppling.	2.2,3 ( 2 )
Stegsvar i stavens mittpunkt vid integrerande återkoppling.	2.4,5 ( 3 )
Stegsvar i stavens mittpunkt vid PI-återkoppling.	2.6-9 ( 4 )
Stegstörningens inverkan på mittpunkten vid proportionell återkoppling.	2.10 ( 5 )
Stegstörningens inverkan på mittpunkten vid integrerande återkoppling.	2.11 ( 6 )
Stegstörningens inverkan på mittpunkten vid PI-återkoppling.	2.12,13(7-8 )
Stegstörningens inverkan på mittpunkten vid framkoppling.	2.14 ( 9 )

Sistnämnda undersökning medelst framkoppling, har vid de experimentella mätningarna uteslutits, på grund av vissa oklarheter i den teoretiska framställningen, enligt laborationen.

### 3. INSTÄLLNING AV PI-REGULATOR FÖR TEMPERATURSTEGSSERVOT

För att i görligaste mån erhålla ett med teorin överensstämmande temperatursteg, har temperaturstegsservot återkopplats medelst en PI-regulator enligt nedanstående figur:



Kopplingsschemat för analogimaskinen framgår av sidan 12.

Schemat kan beskrivas utifrån de ingående potentiometrarna.

Q 03: Inställning av den mot arbetstemperaturen svarande termistorresistansen (börvärde).

Q 02: Inställning av den mot temperatursteget svarande termistorresistansändringen.

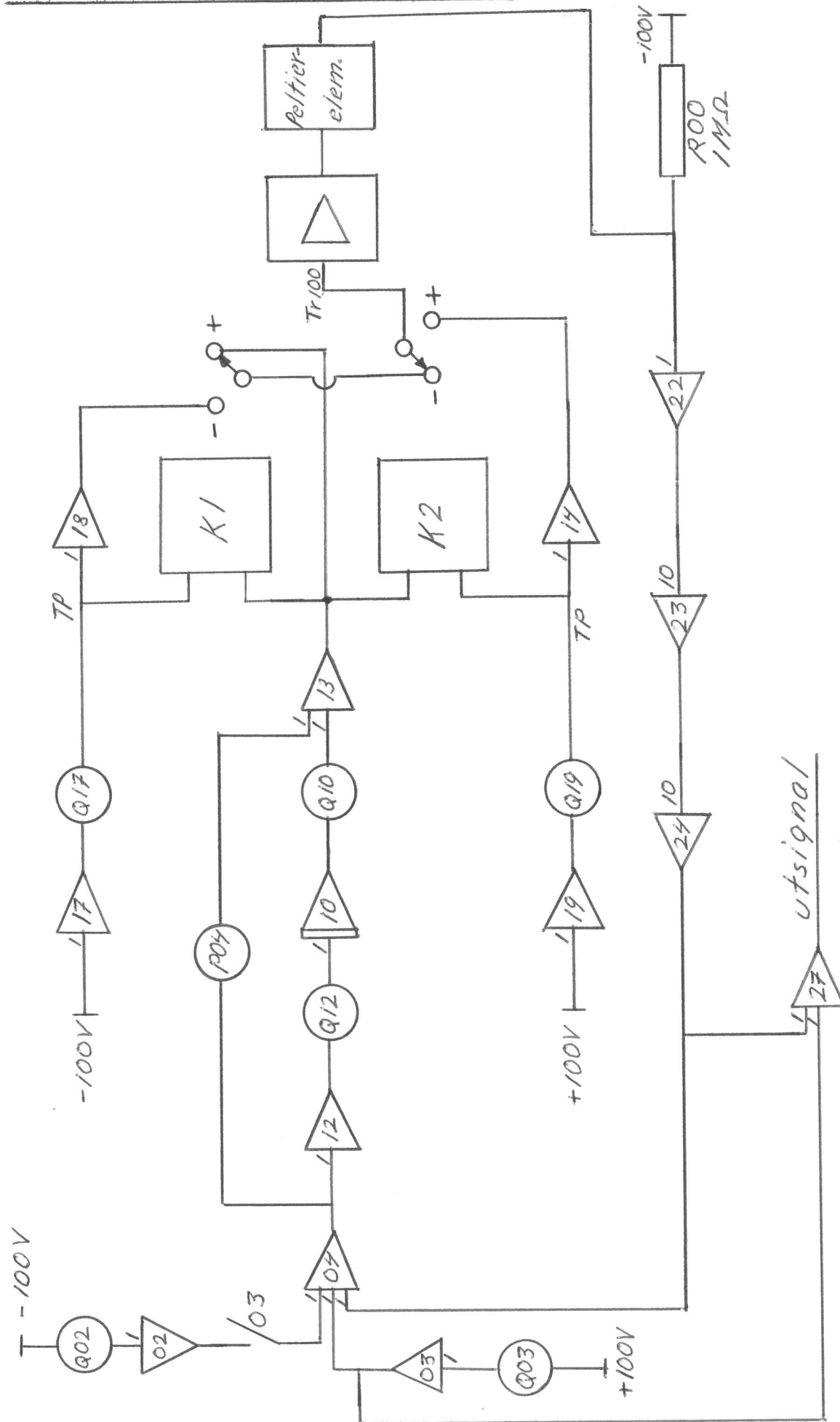
P 04: Proportionalpotentiometer i återkopplingskretsen.

Q 12: Integralpotentiometer i återkopplingskretsen.

Q 10: Fast potentiometer, avsedd att öka noggrannheten hos Q12.

Q 17,19: För att vid ett eventuellt fel begränsa insignalen till förstärkaren, har en begränsare uppkopplats, med hjälp av komparatorerna K 1 och K 2. Med hjälp av Q17,19 varieras signalens maxvärde.

Kopplingschema för temperaturstegsservot.



Genom att signalen från termistorn förstärkts lämpligt, kan dess resistans direkt avläsas på förstärkare 24. Signalen har emellertid, som schemat visar, uttagits på förstärkare 27, eftersom vi här dragit ifrån den mot arbetstemperaturen svarande resistansen, vilket är lämpligt vid registrering på skrivare.

Vid mätningarna har använts termistor nr:1. Vidare har arbetstemperaturen valts godtyckligt till  $15^{\circ}\text{C}$ , då dessa mätningar föregick undersökningen av lämplig arbetstemperatur ( $24^{\circ}\text{C}$ ).

För termistor 1 gäller ungefärligen:

$$t = 15^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 2760 \Omega.$$

$$t = 20^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 2230 \Omega.$$

Således:

$$\Delta t = 5^{\circ}\text{C} \text{ ger } \Delta R = 530 \Omega.$$

Potentiometerlistan kan nu uppskrivas.

P04	x
Q02	0.0530
Q03	0.2760
Q10	0.1000
Q12	x
Q17	0.0100
Q19	0.0100

I diagram 3.1-8 finns steget representerat för olika värden på potentiometrarna P04 och Q12. I diagrammen har potentiometrarna döpts om enligt:

$$P04 = P_p$$

$$Q12 = P_i$$

där index p och i står för proportionell respektive integrerande. Vidare har y-axlarna graderats direkt i  $\Omega$ , då vi vid dessa mätningar inte är intresserade av motsvarande temperaturer, utan endast av stegens utseende.



Det steg som slutligen valts, finns representerat i diagram 3.9. För detta gäller  $P_p = 0.2000$  och  $P_i = 0.0100$ . Valet av detta steg såsom det "bästa" är naturligtvis i viss mån godtyckligt. Valet baserar sig emellertid på, att då värmestaven är ett typiskt lågpåssfilter, har ett visst mått av oscillering i stegets början accepterats, till förmån för kortare stigtid.

#### Resultat

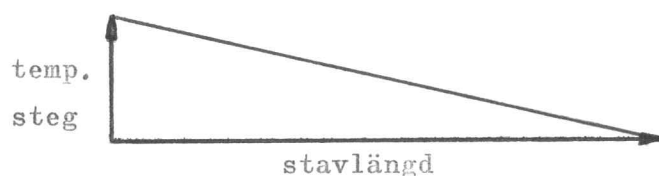
Proportionalpotentiometern  $P_p$  ( P04 ) väljes till 0.2000.

Integralpotentiometern  $P_i$  ( Q12 ) väljes till 0.0100.

#### 4. UNDERSÖKNING AV LÄMPLIG REFERENSTEMPERATUR, SAMT LÄMPLIG STORLEK PÅ STYRSIGNALENS AMPLITUD

För denna undersökning har följande metod använts.

Med hjälp av lokal återkoppling av stavens båda temperaturservon hålles vänster och höger stavände vid samma referens-temperatur (arbetstemperatur). Med hjälp av stegkretsen för vänstra temperaturservot höjes här temperaturen med ett värde svarande mot storleken av det sökta temperatursteget. Efter jämvikt uppmäts temperaturen utefter staven. Man bör få ett resultat enligt följande figur:



##### Vänstra temperaturservot

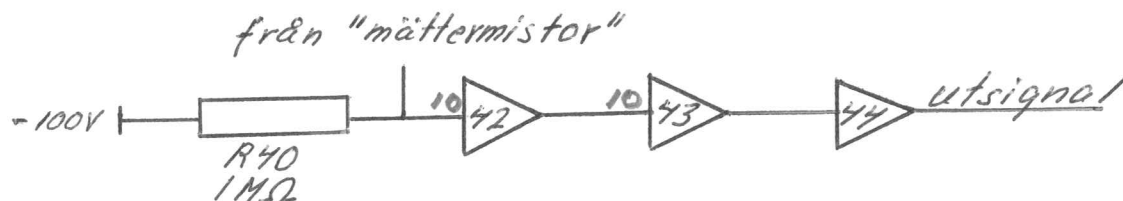
För kopplingsschema till detta servo hänvisas till kap. 3, sid. 12. Dock kan vid dessa undersökningar förstärkare 27 slopas, då vi endast är intresserade av den verkliga termistorresistansen, vilken fås på förstärkare 24.

##### Högra temperaturservot

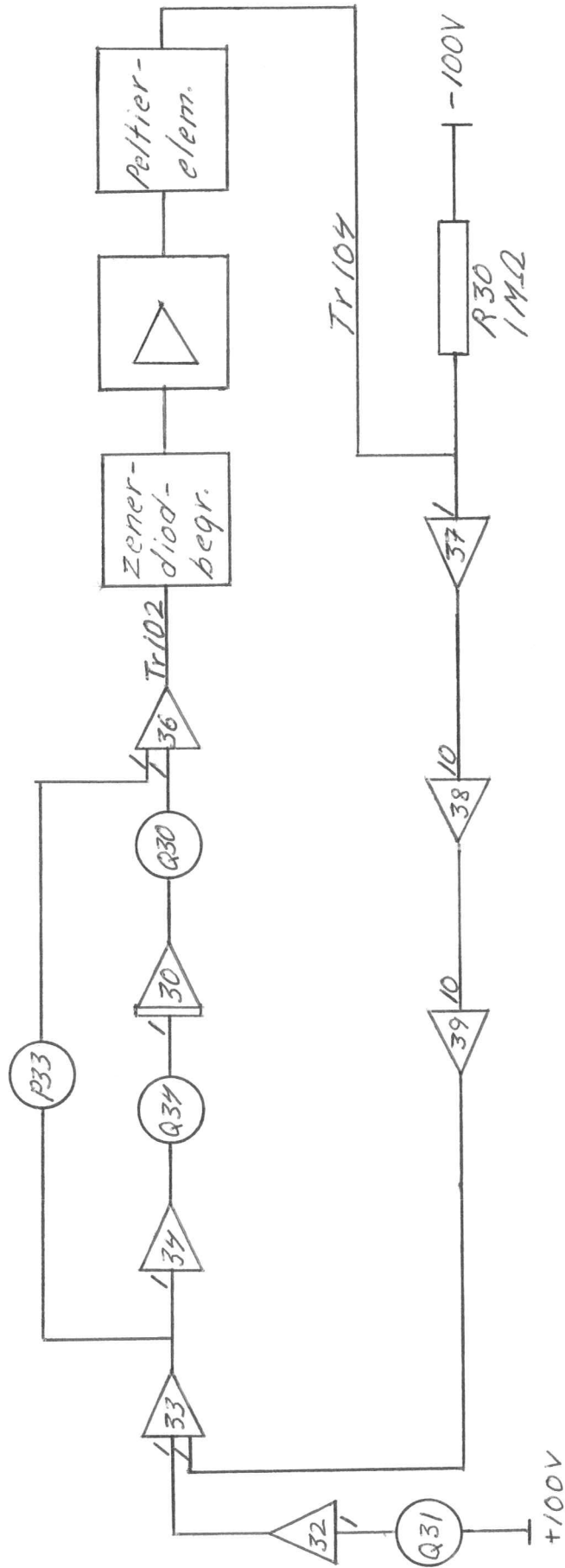
Kopplingsschemat framgår av sid. 16. Schemat är i huvudsak identiskt med vänstra servots, med undantag av att stegkretsen uteslutits, liksom också begränsaren till förstärkaringången, enär analogmaskinen <sup>d</sup>enast är utrustad med två komparatorer. I gengäld har till förstärkaringången kopplats två stycken zenerdioder, vilka "klipper" vid för hög insignal.

##### "Mättermistor"

För att erhålla "mättermistorns" resistans har följande schema använts, där resistansen avläses på förstärkare 44.



Kopplingschema för högra temperaturservot.



Potentiometerlistor

vänster		höger	
temp. servo		temp. servo	
P04	0.2000	P33	0.2000
Q02	x	Q30	0.1000
Q03	x	Q31	x
Q10	0.1000	Q34	0.0100
Q12	0.0100		
Q17	0.0100		
Q19	0.0100		

Använda termistorer:

vänster temperaturservo	termistor nr: 1
höger temperaturservo	termistor nr: 3
"mättermistor"	termistor nr: 2

För att få så stor noggrannhet som möjligt har vid dessa mätningar termistorkaraktistikorna icke lineariserats, utan sambandet mellan temperatur och resistans fås direkt ur diagrammen 1.2.1-3.A.

Temperaturen har uppmätts i tre punkter på staven, nämligen punkterna  $1/4$ ,  $1/2$  och  $3/4$ , där 1 betecknar stavlängden. (enligt laborationen gitterpunkterna 2,4 och 6)

Resultatet av mätningarna finns presenterat i diagram 4.1-18. Ur praktisk synpunkt har i dessa diagram arbetstemperaturen valts som nollnivå. I diagrammen finns också den teoretiska temperaturfördelningen inritad.

Låt  $e$  beteckna respektive temperaturers avvikelse från det teoretiska värdet. I diagram 4.19 har för varje arbetstemperatur avsatts  $\sum_{i=1}^3 e^2$ , där  $i$  anger summation över de tre mätpunkterna på staven, som funktion av temperatursteget.

Diagrammet visar, att lämpligt temperatursteg är  $5^{\circ}\text{C}$ , samt lämplig arbetstemperatur är omkring  $24^{\circ}\text{C}$ .

I diagram 4.20 har för temperatursteget  $5^{\circ}\text{C}$  avsatts  $\sum_{i=1}^3 |e_i|$  som funktion av arbetstemperaturen. Diagrammet visar att lämplig arbetstemperatur är  $24^{\circ}\text{C}$ .

De stora variationer med arbetstemperaturen som diagram 4.19 uppvisar, tyder på att isoleringen av staven inte är tillfyllest. För en idealt isolerad stav borde vi, i den mån mätapparaturens noggrannhet medger, få med teorin överensstämmande resultat, oavsett arbetstemperatur. Vid dålig isolering är det naturligt att tänka sig, att bästa resultatet erhålls, om arbetstemperaturen sätts lika med rumstemperaturen, minskad med halva stegtemperaturen. Då rumstemperaturen vid mätningarna var ungefär  $26^{\circ}\text{C}$ , är således vårt resultat väntat.

Uppskattning av lämplig storlek på temperatursteget ställer sig svårare. Det är emellertid klart, att vid små värden får vi relativt sett ökad inverkan av brus, samt vid stora värden ökat värmeutbyte med omgivningen.

### Resultat

lämplig arbetstemperatur	$24^{\circ}\text{C}$
lämplig storlek på temperatursteget	$5^{\circ}\text{C}$

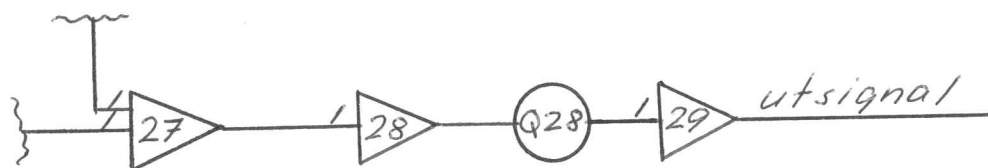
## 5. STEGSVARSANALYS PÅ ÖPPNA SYSTEMET

Det öppna systemets stegsvar har upptagits i punkterna  $1/4$ ,  $1/2$  och  $31/4$ , där 1 betecknar stavens längd (gitterpunkterna 2, 4 och 6).

### Kopplingsschemata:

#### Vänstra temperaturservot

Schemat framgår av kap. 3, sid. 12. För senare jämförelse är det önskvärt, att vid registreringen arbeta med ett temperatursteg, av samma storlek som det teoretiska. Till ovanstående kopplingsschema har därför fogats en amplitudskalningskrets enligt nedan:

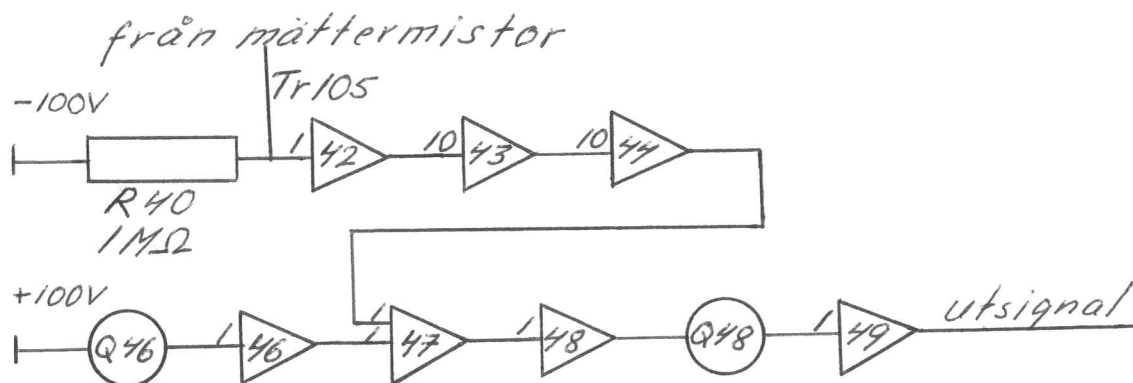


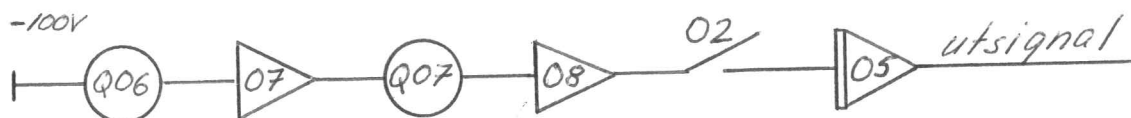
#### Högra temperaturservot

Kopplingsschemat är identiskt med det i kap. 4, sid. 16.

#### Mättermistor

Kopplingsschemat framgår av nedanstående figur. Det representerar subtraktion av den mot arbetstemperaturen svarande termistorresistansen, samt amplitudskalning.



Svep

Q06 är en fast potentiometer (värde 0.1000) avsedd att höja noggrannheten hos potentiometer Q07.

Använda termistorer:

vänstra temperaturservot	termistor nr: 1
högra temperaturservot	termistor nr: 3
mättermistor	termistor nr: 2

Skalning:

Registreringarna har gjorts på papper av A3-format, varför naturligtvis också skalningen baserats på detta format. Då emellertid de presenterade diagrammen är nerminskade till A4-format, får skalningen inte sättas i samband med dessa diagram.

Amplitudskalning:

Enligt diagram 2.1 för det teoretiska stegsvaret skall gälla, att temperatursteget  $5^{\circ}\text{C}$  svarar mot 20 cm på papperet. Låt  $\Delta R$  beteckna den mot temperatursteget  $5^{\circ}\text{C}$  svarande termistorresistansändringen.

Skrivarens penskala inställes på 0.1 V/cm.

Motsvarande skalpotentiometers värde fås som:  $\frac{20 \cdot 0.1}{\Delta R \cdot 10^{-2}}$ ,

eller förenklat:  $\frac{200}{\Delta R}$

Potentiometervärdena för respektive termistorer finns införda direkt i potentiometerlistan.

Vid lineariseringen av termistorerna har lineariseringsmetod 1, kap. 1.2 sid. 3 använts.

Tidsskalning:

I diagram 2.1 för det teoretiska stegsvaret har använts tids-  
skalan 32.54 s/cm.

Skrivarens armskala inställes på 10 V/cm. Värdet på skal-  
potentiometern i svepkretsen fås då som:  $10/100 \cdot 32.54 =$   
 $=0.00307$ . Genom seriekoppling medelst den fasta potentiometern  
Q06 (värde 0.1000) skall således potentiometern Q07 åsättas  
värdet 0.0307.

Slutligen skall framhållas, att integralpotentiometrarna  
i de lokala återkopplingskretsarna för temperaturservona  
ökats till värdet 0.0500. Detta på grund av vissa svårigheter  
för servona att hålla de inställda arbetstemperaturerna.

Potentiometerlistor:

vänster temp. servo	höger temp. servo	mät- termistor	svep- krets
P04 0.2000	P33 0.2000	Q46 0.2042	Q06 0.1000
Q02 0.0311	Q30 0.1000	Q48 0.5814	Q07 0.0307
Q03 0.1984	Q31 0.1948		
Q10 0.1000	Q34 0.0500		
Q12 0.0500			
Q17 0.0100			
Q19 0.0100			
Q28 0.6431			

Resultatet av körningarna finns presenterat i diagram 5.1.  
Som framgår, lämnar kurvorna en del övrigt att önska. Det  
brus på signalen, som hör från termistorerna bör elimineras  
med någon lämplig typ av filtrering. Vidare är för begynnelse-  
och sluttemperaturerna avvikelserna från de teoretiska resultaten  
väsentliga. Den lineariseringsmetod som använts för termistorerna

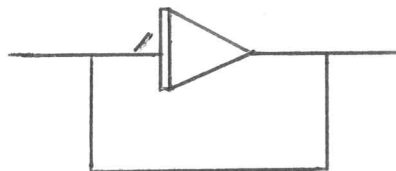


bidrar naturligtvis härtill, men knappast i den utsträckning som resultaten gör gällande. Mer troligt är, att isoleringen inte är tillfyllest, en misstanke som uppkom redan vid temperaturlinearitetsanalysen i kap. 4.

För att erhålla bättre resultat, har stegsvarsanalysen körts om, under gynnsammare betingelser. Sålunda har, för att förbättra stationärvärdena, följande åtgärder vidtagits:

1. Ökning av isoleringen från  $\varnothing$  5 cm till  $\varnothing$  20 cm.
2. Lineariseringen av termistorerna har utförts enligt lineariseringsmetod 2, kap. 1.2, sid.6. Enligt denna metod bör vi få riktiga begynnelsevärden. Genom att för de olika gitterpunkterna linearisera över intervallen 1.25, 2.50 resp. 3.75 °C bör vi också få rätt slutvärden. Detta har emellertid inte gjorts, utan samtliga lineariseringar är utförda i intervallet 5 °C.
3. Då karakteristiken för termistor 1, enligt diagram 1.2.1 inte är helt linjär, har denna termistor utbytt mot termistor nr:4. Som kontroll har samtidigt mättermistor nr: 2 utbytt mot termistor nr: 5.

För att eliminera brus på signalerna, har följande filter, med överföringsfunktionen  $- 1/ (1 + s)$ , använts.



Använda termistorer:

vänstra temperaturservot	termistor nr:4
högra temperaturservot	termistor nr:3
mättermistor	termistor nr:5

Skrivarinställning:

armskala 10 V/cm  
penskala 0.1V/cm

På sidan 25,26 och 27 finns samtliga kopplingskretsar, för den slutliga körningen av temperaturstegsanalysens sammanfattade.

Potentiometerlistor:

vänster temp. servo	höger temp. servo	mät- termistor	svep- krets
P04 0.2000	P33 0.2000	Q46 0.2035	Q06 0.1000
Q02 0.0327	Q30 0.1000	Q48 0.5935	Q07 0.0307
Q03 0.2009	Q31 0.1931		
Q10 0.1000	Q34 0.0500		
Q12 0.0500			
Q17 0.0100			
Q19 0.0100			
Q28 0.6116			

Resultatet finns presenterat i diagram 5.2.

För att få en uppfattning av systemdynamiken har stigtid och insvängningstid beräknats för de olika kurvorna. För dessa tider har använts följande definitioner:

Stigtid: Det inverterade värdet av maximum av utsignalens tidsderivata.

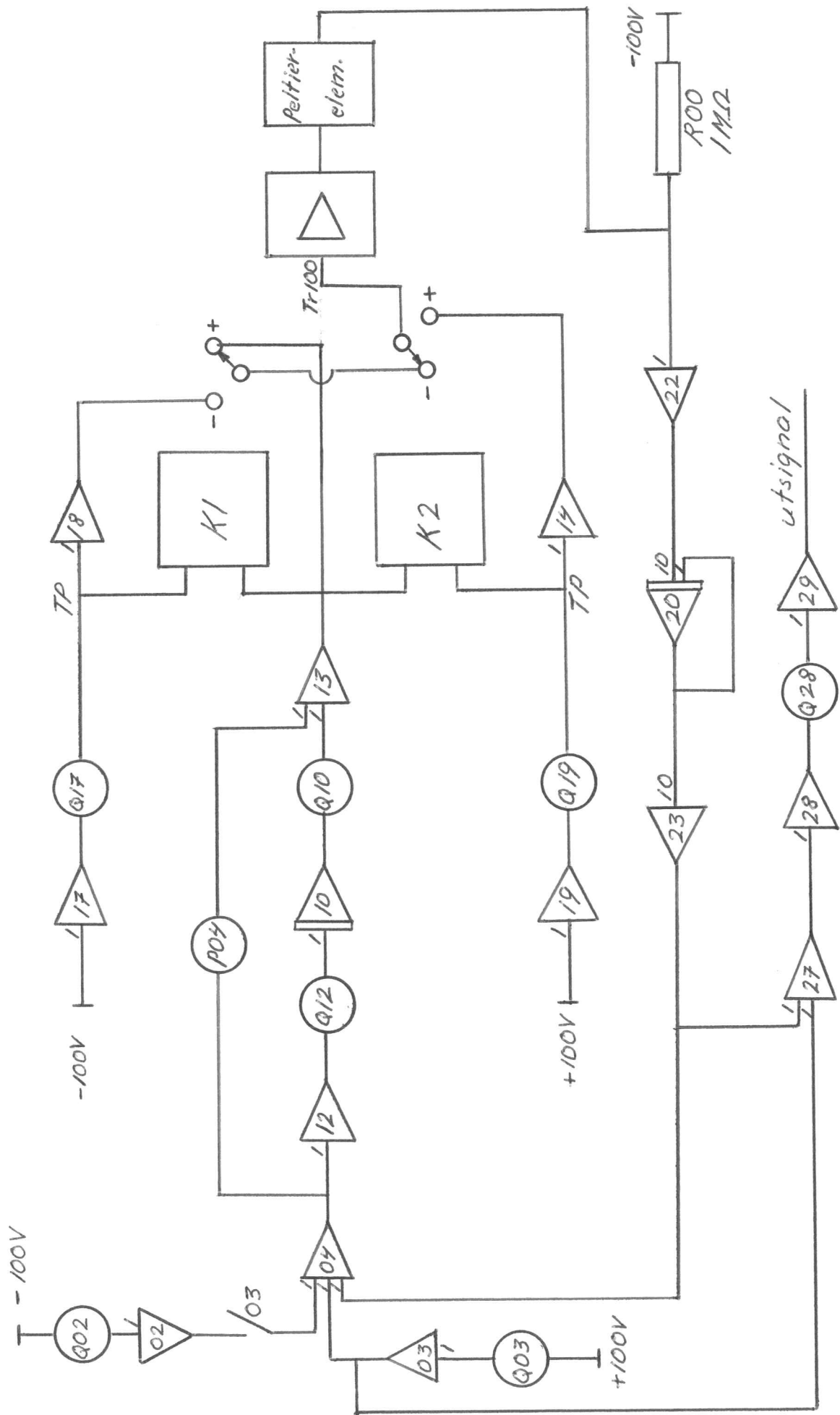
Insvängningstid: Det första värde på tiden, sådant att utsignalen för alla tider större än denna tar värden mellan  $1 - p$  och  $1 + p$ .  $p$  har valts till 0.05.

I nedanstående tabell är motsvarande värden för de teoretiska kurvorna satta inom parentes.

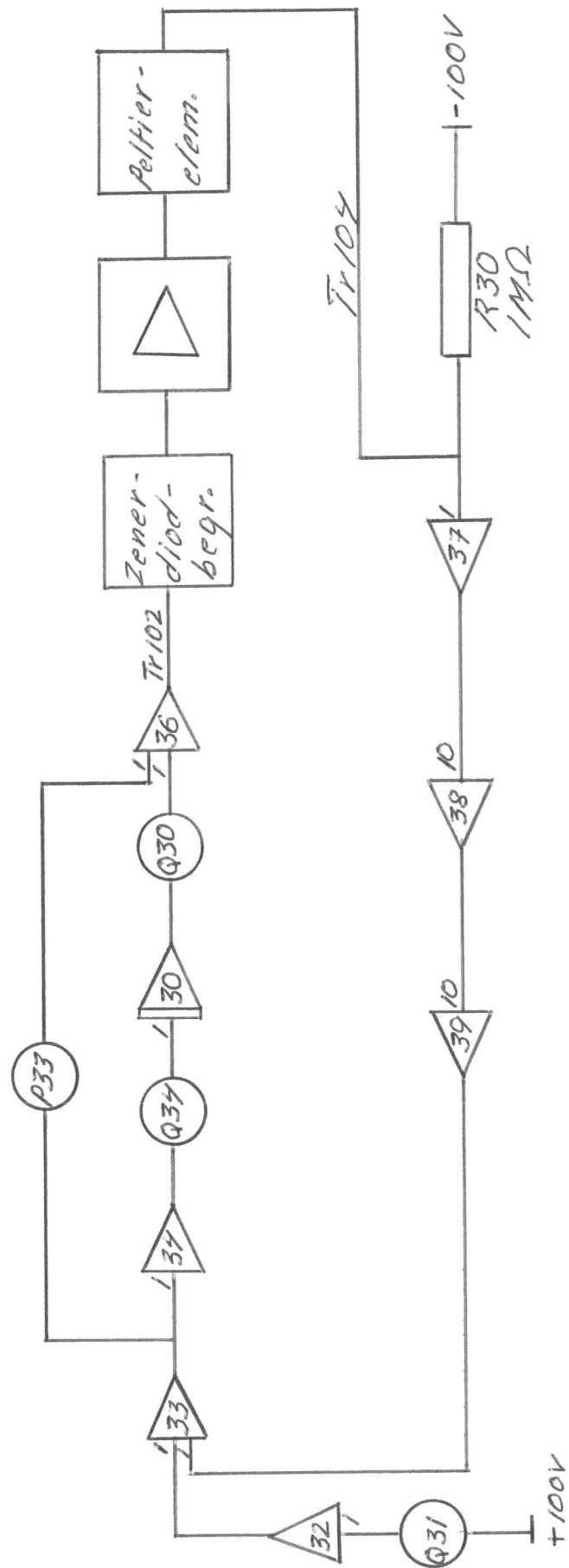
gitterpunkt	stigtid (min.)	insvängningstid (min.)
1/4 (2)	2.8 (2.6)	4.5 (5.3)
1/2 (4)	2.3 (2.1)	5.6 (4.8)
31/4 (6)	0.54 (0.81)	4.3 (3.9)

På grund av de avvikelser i begynnelse- och sluttemperatur, som enligt diagram 5.2 föreligger, kan ovanstående tabell inte tas som en fullgod jämförelse av systemdynamiken.

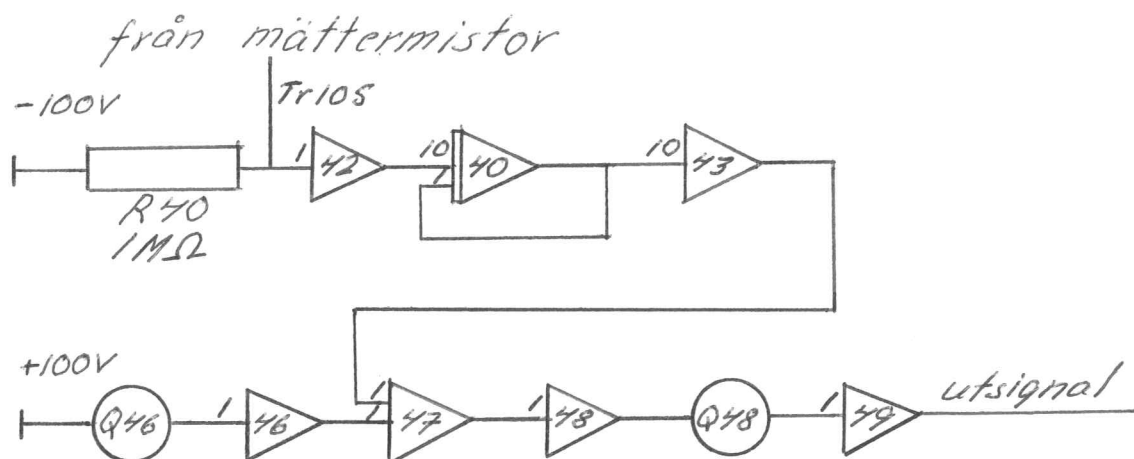
Trots de vidtagna åtgärderna är samtliga begynnelse och slutvärde för höga. Den lineariseringsmetod av termistor-karakteristikorna som använts, borde som tidigare nämnts vid korrekt kalibrering av termistorerna ge rätt begynnelsevärden. Då så inte är fallet, kan en rimlig orsak vara, att termistorerna inte är kalibrerade med tillräcklig noggrannhet. Som nämnts i kap. 1.2 ger ett fel i termistorresistans på  $\approx 20 \Omega$  ett fel på papperet (A3-format) av  $\approx 1.2$  cm.



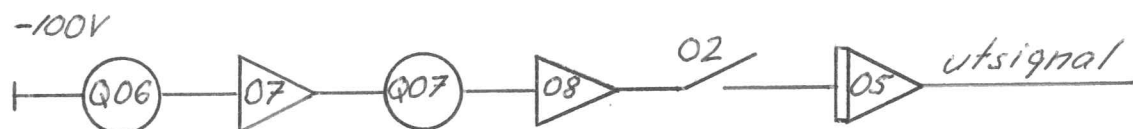
Kopplingschema för högra temperaturservot.



Kopplingsschema för mättermistorn.

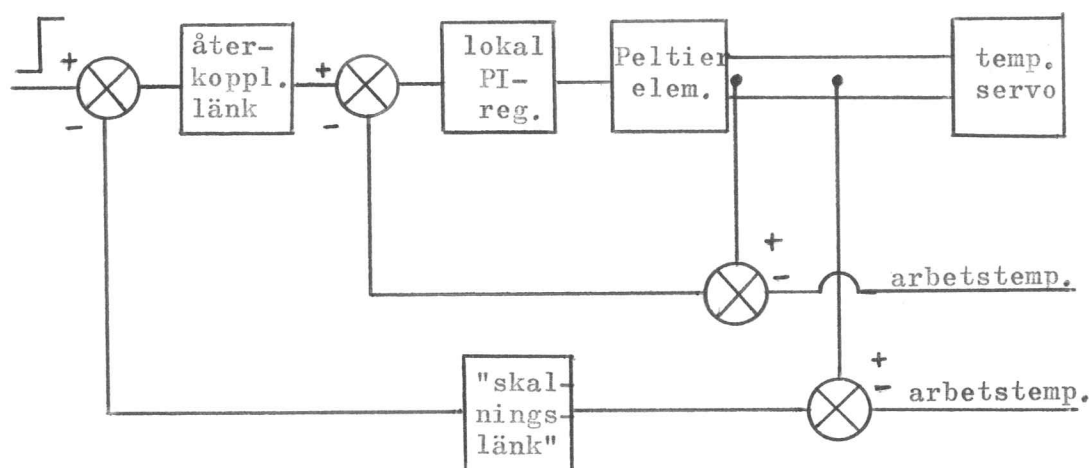


Kopplingsschema för svepet.



## 6. ÅTERKOPPLING FRÅN STAVENS MITTPUNKT

För att erhålla en utsignal från stavens mittpunkt, som i görligaste mån följer den pålagda insignalen vid vänster stavände, har staven återkopplats medelst P, I respektive PI-återkoppling. Den principiella uppbyggnaden av denna återkoppling framgår av nedanstående figur:



"Skalningslänken" i ovanstående figur är en proportionell länk, vars närvaro är orsakad av termistorernas olika karakteristik. Vi är vid mätningarna intresserade av temperaturstorheter. Styrkretsarna för temperaturservona är emellertid baserade på motsvarande termistorresistanser. Antag ett givet temperatursteg svarar mot resistansändringen  $\Delta R_1$  för vänstra termistorn i ovanstående figur. Motsvarande resistansändring vid samma temperatursteg för termistorn i stavens mittpunkt benämnes  $\Delta R_2$ . För att insignal och "återkopplingssignal" för vänstra servot med tillhörande termistor skall vara likvärdiga, skall "skalningslänken" således sättas värdet  $\Delta R_1 / \Delta R_2$ .

Detaljschemata för kopplingarna framgår av sid. 32 och 33.

En första preliminär körning med temperatursteget  $5^{\circ}\text{C}$  visade, att för värden på parametrarna i återkopplingskretsen av samma storleksordning som för den teoretiska modellen enligt kap. 2, blev vänstra temperaturservot lätt överstyrt, d.v.s. Peltierelementen arbetade inom för stort temperaturintervall. För att undvika detta, minskades temperatursteget till  $2.5^{\circ}\text{C}$ . Motsvarande värden för termistorresistanserna för detta temperatursteg fås genom insättning i ekvationerna på sid. 7, kap. 1.

Använda termistorer:

vänster temperaturservo	termistor nr: 4
höger temperaturservo	termistor nr: 3
mättermistor	termistor nr: 5

termistor nr: 4

$$t = 24^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 2009 \quad .$$

$$t = 26.5^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 1839 \quad .$$

Således:

$$\Delta t = 2.5^{\circ}\text{C} \text{ ger } \Delta R = 170 \quad .$$

termistor nr: 5

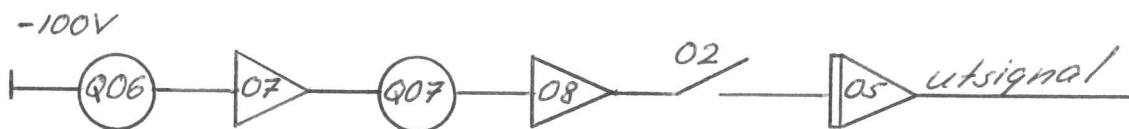
$$t = 24^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 2035 \quad .$$

$$t = 26.5^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 1859 \quad .$$

Således:

$$\Delta t = 2.5^{\circ}\text{C} \text{ ger } \Delta R = 176 \quad .$$



Kopplingsschema för svepet:

På grund av de långsammare förloppen vid I-återkoppling, har här jämfört med P och PI-återkoppling tidsskalan "fördubblats". Motsvarande värde på potentiometern Q07 är i nedanstående potentiometerlista satt inom parentes.

Skrivarinställning:

armskala 10 V/cm

penskala 0.1 V/cm

Potentiometerlistor:

mät- termistor	steg	åter- koppling	vänster temp.servo	höger temp.servo
P47 0.9659	Q02 0.0170	Q08 1/T, Q09 K/100 Q15 K/100	P04 0.2000	P33 0.2000
Q46 0.2035			Q03 0.2009	Q30 0.1000
Q48 0.4545			Q10 0.1000	Q31 0.1930
			Q12 0.0500	Q34 0.0500
			Q17 0.0100	
			Q19 0.0100	
svep				
Q06 0.1000				
Q07 0.0307 (0.0154)				

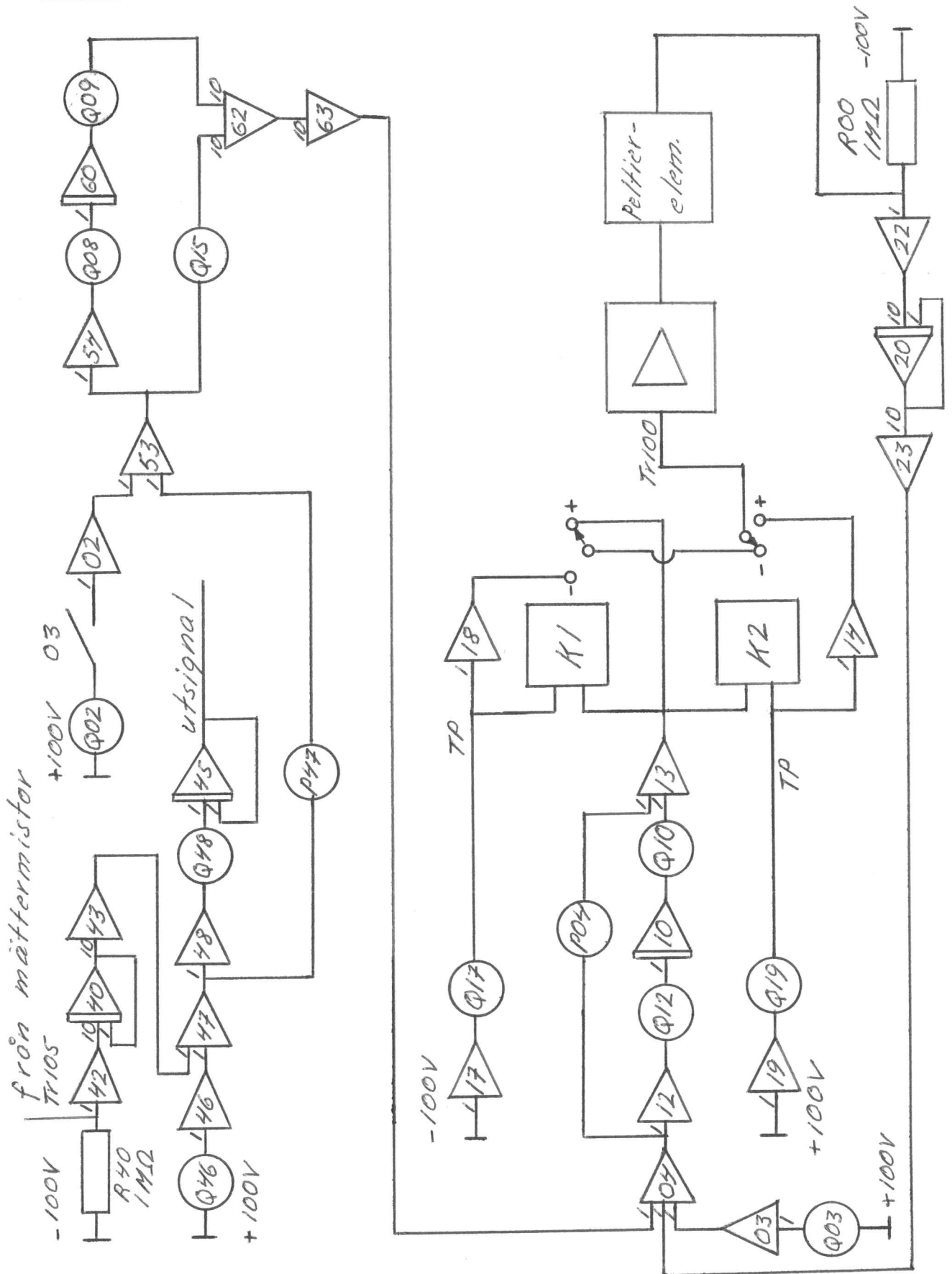
Enligt potentiometerlistan skall potentiometer Q08 åsättas värdet  $1/T \cdot \beta$ . Detta värde finns i nedanstående tabell uträknat för de olika värden som använts på T, vid körning på den teoretiska modellen, samt den verkliga värmestaven.

Enligt tidigare gäller:

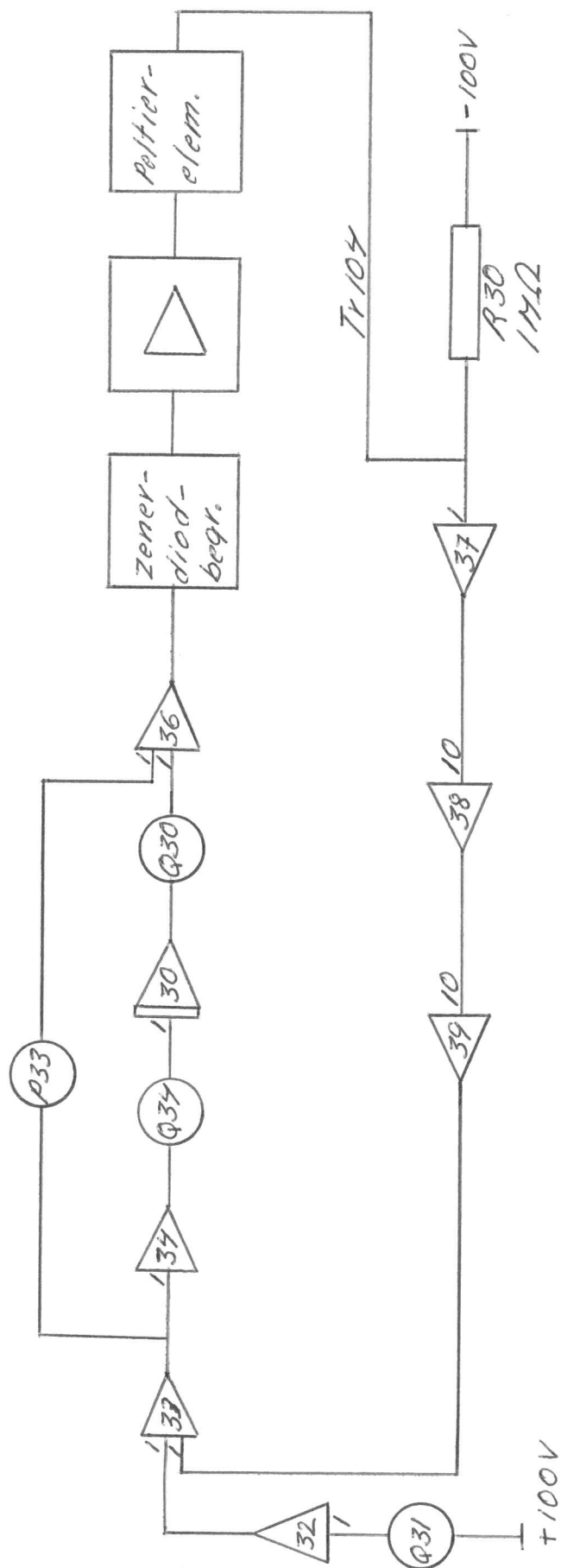
$$\beta = 128$$

T	$1/T \cdot \beta$
0.015	0.5208
0.020	0.3906
0.050	0.1562
0.100	0.0781
0.250	0.0312
0.500	0.0156

Kopplingsschema för vänster temperaturservo, med mättermistor-  
krets och återkopplingskrets.



Kopplingsschema för höger temperaturservo.



Resultaten av mätningarna finns presenterade i nedanstående diagram. Motsvarande diagramnummer för den teoretiska modellen är satta inom parentes.

	diagram nr:
Proportionell (P) återkoppling	6.1-2 (2.2-3)
Integrerande (I) återkoppling	6.3-4 (2.4-5)
Proportionell och integrerande (PI) återkoppling	6.5-8 (2.6-9)

Kommentarer till diagrammen:

1. Diagrammen bekräftar de teoretiska resultaten för återkoppling, nämligen
    - 1a. Proportionell återkoppling minskar det stationära felet.
    - 1b. Integrerande återkoppling eliminerar helt det stationära felet.
    - 1c. Proportionell och integrerande återkoppling eliminerar helt det stationära felet, samt ger ett snabbt system.
  
  2. Före temperaturstegets påläggande borde temperaturen utefter hela staven, och speciellt i mittpunkten, vara  $24^{\circ}\text{C}$ . Att så inte är fallet visade exempelvis stegsvarsanalysen för det öppna systemet i kap. 5. Enligt principschemat på sid. 28 är emellertid återkopplingskretsen ständigt inkopplad, även före stegets påläggande. Beroende på typ av återkoppling kommer därför före stegets inkoppling stavens mittpunkt att antaga en temperatur, som helt eller delvis överensstämmer med den mot den inställda termistorresistansen svarande temperaturen ( $24^{\circ}\text{C}$ ). I konsekvens med kapitel 5 är emellertid detta ingen garanti för att begynnelsestemperaturen är den rätta ( $24^{\circ}\text{C}$ ).
- Förhållandet efter stegets påläggande är analogt med punkt 2.

3. Jämfört med resultaten för den teoretiska modellen uppvisar mätningarna en mycket markant första undersläng. Vid höga värden på återkopplingsparametrarna sjunker mittpunktstemperaturen t.o.m. under  $24^{\circ}\text{C}$ . Detta tyder på en olinearitet hos systemet.

4. Mätningarna visar, att för jämförbara kurvor från den teoretiska modellen, resp. det verkliga systemet, är återkopplingsparametrarna i det senare fallet avsevärt lägre.

Att återkopplingsparametrarna enligt punkt 4 ovan blir lägre, betingas bl.a. av följande två orsaker.

1. Den teoretiska modellen enligt kap. 2 är baserad på åtta poler för värmestavens överföringsfunktion. I verkligheten är emellertid antalet poler oändligt. Denna approximation av verkligheten ger avsevärt högre värden på återkopplingsparametrarna. I laboration 2, sid. 27 finns en tabell över den maximala förstärkningen för proportionell resp. integrerande återkoppling, då värmestavens överföringsfunktion approximerats med olika antal poler. Vi ser bl.a. att för åtta poler blir vid proportionell återkoppling den maximala förstärkningen 34, medan den i verkligheten endast är 23.2.

2. Det temperatursteg som erhålles från vänstra temperaturservot är inte perfekt. Det har en tidskonstant skild från noll, samt en väl markerad översläng. Vidare är stegutseendet endast giltigt för positiva temperatursteg. Vid negativa temperatursteg blir utseendet ett annat, på grund av termistor-karakteristikens inverkan.

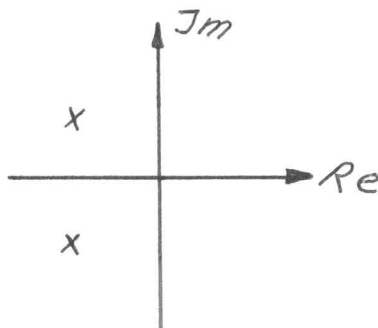
För att få en uppfattning om inverkan enligt punkt 2 ovan på återkopplingsparametrarna, har följande metod använts:

På teoretisk väg har simulerats ett temperatursteg liknande

det som erhålls från vänstra temperaturservot. Detta steg pålägges den teoretiska modellen (8 poler). Endast proportionell återkoppling har betraktats.

### Stegsimulering

Vi antar servot är ett andra ordningens system. Singularitetsdiagrammet i sin enklaste form ges enligt nedan:



Överföringsfunktionen kan således generellt tecknas:

$$G(s) = \frac{1}{(s + a + ib) \cdot (s + a - ib)} \quad , \text{ eller förenklat}$$

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + Ks + L}$$

Systemet skall vid stationaritet följa ett insteg. Således:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{s^2 + Ks + L} = 1$$

Härur fås  $L = 1$ .

Således:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + Ks + 1}$$

Inför tillståndsvariabler enligt:

$$X_1 = \frac{s}{s^2 + Ks + 1} \cdot U$$

$$X_2 = \frac{X_1}{s}$$

Detta ger tillståndsekvationerna:

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} -K & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} U$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} x$$

På sid 39 finns kopplingsschema för ovanstående system, tillsammans med den teoretiska modellen för värmestaven, samt proportionell återkoppling.

Svepkrets:



Skrivarinställning:

armskala 5 V/cm

penskala 1 V/cm



Potentiometerlista:

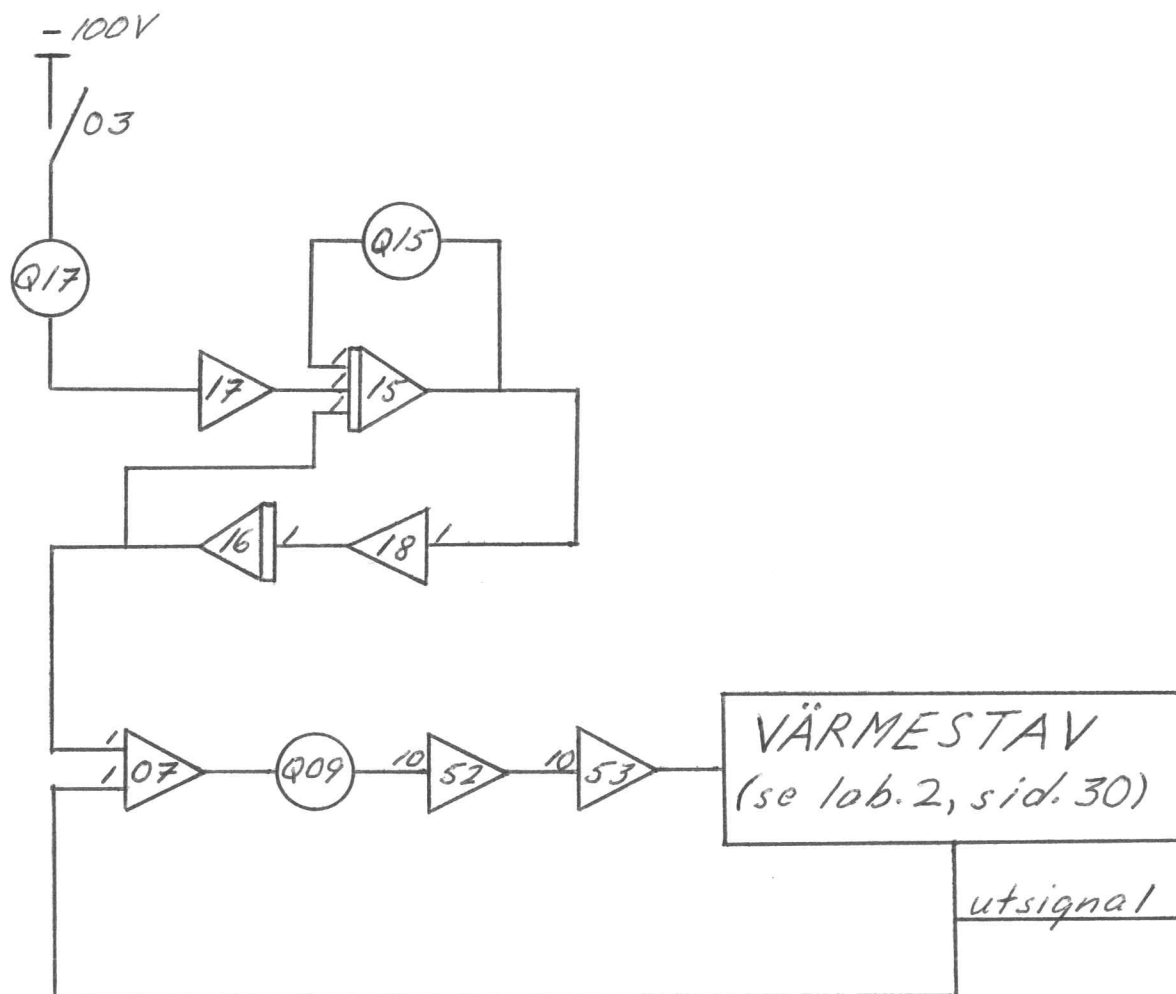
stav	steg	svcp	återkoppl.
P00 0.5000	Q15 K	P05 0.0100	Q09 K/100
P01 0.5000	Q17 0.0800		
P02 0.5000			
P10 0.5000			
P11 0.5000			
P12 0.5000			
P20 0.5000			
P21 0.5000			
P22 0.5000			
P30 0.5000			
Q02 0.5000			
Q12 0.5000			
Q22 0.5000			
Q32 0.5000			

Det bör observeras att i ovanstående potentiometerlista betecknar K två olika saker. Sammanhanget ger lätt dess betydelse.

I diagram 6.9 finns det simulerade temperatursteget representerat för olika värden på K. Dessa temperatursteg skall jämföras med det önskade temperatursteget i diagram 6.2. Vi ser att  $K = 0.89$  ger ett temperatursteg, vars storlek på överslängen överensstämmer med den för servot. Vi ser också, att för att öka överensstämmelsen mellan stegen bör en lämplig transformering av tidsskalan ske. Till detta har emellertid ingen hänsyn tagits vid nedanstående körningar.

I diagram 6.10-11 finns motsvarande stegsvar i stavens mittpunkt representerat. Motsvarande kurvor då ett "perfekt" steg använts framgår av diagram 2.2-3. En jämförelse visar, att då det simulerade temperatursteget används, blir systemet mera instabilt. Skillnaden är dock obetydlig, och torde knappast kunna förklara de låga värdena på återkopplingsparametrarna.

Kopplingsschema för generering av temperatursteg,  
(värmestav) samt proportionell återkoppling



För att få en bättre uppfattning om rimligheten av de låga parametervärdena, har en andra undersökningsmetod använts. Denna baserar sig på följande:

1. På experimentell väg bestäms den maximala förstärkningen för det verkliga systemet vid proportionell återkoppling.
2. Överföringsfunktionen för temperaturservot bestäms. (överföringsfunktionen för värmestaven kan beräknas teoretiskt)
3. Med hjälp av resultaten enligt punkt 2 bestäms teoretiskt den maximala förstärkningen, och jämföres med den enligt punkt 1 erhållna.

Vid bestämningen av den maximala förstärkningen har, för undvikande av överstyrning av temperaturservot, temperatursteget minskats ytterligare till  $1^{\circ}\text{C}$ . Motsvarande termistorresistanser beräknas ur ekvationerna på sid. 7, kap. 1.2.

termistor nr: 4

$$t = 24^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 2009 \Omega .$$

$$t = 25^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 1930 \Omega .$$

Således:

$$\Delta t = 1^{\circ}\text{C} \text{ ger } \Delta R = 69 \Omega .$$

termistor nr: 5

$$t = 24^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 2035 \Omega .$$

$$t = 25^{\circ}\text{C} \text{ ger } R = 1962 \Omega .$$

Således:

$$\Delta t = 1^{\circ}\text{C} \text{ ger } \Delta R = 73 \Omega .$$

För kopplingsschemata, skrivarinställning mm, hänvisas till sid. 30-33.

Potentiometerlista:

mät- termistor	steg	åter- koppling	vänster temp.servo	höger temp.servo
P47 0.9452 Q46 0.2035 Q48 0.5479	Q02 0.0069	Q08 0.0000 Q09 0.0000 Q15 K/100	P04 0.2000 Q03 0.2009 Q10 0.1000 Q12 0.0500 Q17 0.0100 Q19 0.0100	P33 0.2000 Q30 0.1000 Q31 0.1930 Q34 0.0500
svep				
Q06 0.1000 Q07 0.0307				

Resultatet av mätningarna framgår av diagram 6.12-14.

Ur dessa kurvor uppskattas:

$$K_{\max} = 17.5$$

Temperaturservots överföringsfunktion kan bestämmas medelst följande metod:

Som insignal väljes en sinussignal, av varierande frekvens. Utifrån utsignalens fas och amplitud bestämmes överföringsfunktionen.

En sinussignal genereras på analogmaskin genom att utgå från en andra ordningens ordinär differentialekvation.

Se B. Häggman, "Kompendium i analogmaskiner", sid. 41.

För att förenkla arbetet har vi emellertid direkt utgått från den överföringsfunktion för ett andra ordningens system, som erhöles enligt sid. 36 och följande, nämligen:

$$\frac{1}{s^2 + 0.89s + 1}$$

Enligt tidigare bör emellertid detta system tidstransformeras, för att öka överensstämmelsen med det verkliga systemet. Denna transformering bestämmes genom att utgå från stegsvaren för det verkliga systemet resp. det simulerade systemet, enligt diagram 6.2 resp. 6.9. Ur dessa diagram bestämmes:

	verkligt system tid (s)	simulerat system tid (s)	skal faktor
översläng	12.1	3.0	4.03
undersläng	25.7	6.5	3.95

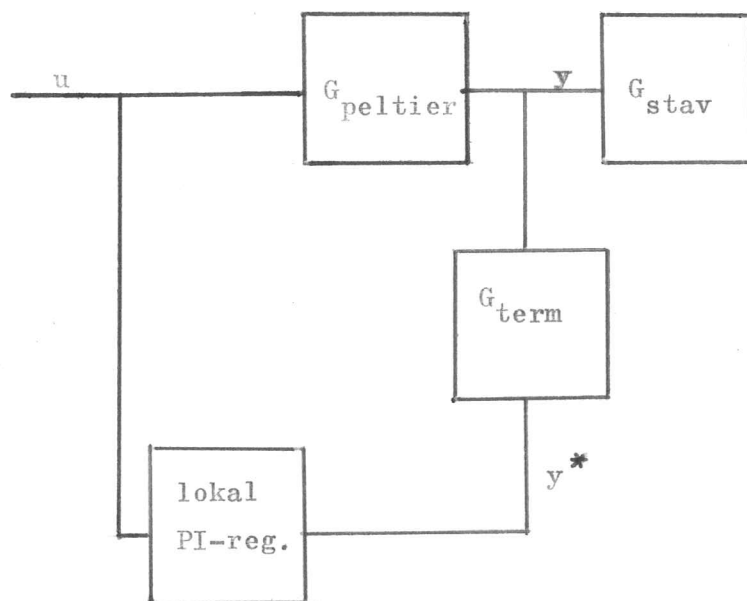
Ur ovanstående tabell fås skalfaktorns medelvärde till 3.99, vilket avrundats till 4.

Överföringsfunktionen fås då som:

$$K_1 \cdot \frac{1/16}{s^2 + 0.89/4 s + 1/16}, \text{ eller förenklat}$$

$$\frac{K_1}{16s^2 + 3.56s + 1}$$

Det skall observeras att detta inte är servots överföringsfunktion från inspanning till uttemperatur, utan från inspanning till utspänning. Betrakta nedanstående blockschema:



Det stegsvar vi registrerar enligt diagram 6.2 är utspänningen  $y^*$ . Således fås:

$$\frac{y^*}{u} = \frac{K_1}{16s^2 + 3.56s + 1}$$

Vi är emellertid intresserade av överföringsfunktionen från inspanningen  $u$  till uttemperaturen  $y$ .

Enligt ovanstående schema gäller:

$$y^* = G_{\text{term}} \cdot y$$

Således fås:

$$\frac{y}{u} = \frac{K_1}{16s^2 + 3.56s + 1} \cdot \frac{1}{G_{\text{term}}}$$

Enligt Hafo's broschyr "Termistorer" är överföringsfunktionen för termistorerna ett första ordningens system av typen:

$$G_{\text{term}} = \frac{K}{1 + \tau s}$$

Upplysningsvis kan nämnas att  $\tau$  är  $\approx 0.3$  s.

För termistorn i den lokala återkopplingskretsen för servot sättes:

$$K = K_2$$

Således fås servots överföringsfunktion från inspänning till uttemperatur:

$$G_{\text{servo}} = \frac{K_1}{16s^2 + 3.56s + 1} \cdot \frac{1 + \tau s}{K_2}$$

För servot gäller vidare:

Insignal 0.69 V ger utsignal 1 °C.

Detta ger:

$$\frac{K_1}{K_2} = 1/0.69$$

Vid en stabilitetsundersökning måste hänsyn också tagas till termistorn i stavens mittpunkt. Vi förutsätter att dynamiken hos denna är densamma som för termistorn i vänstra ändpunkten, enär termistorerna är identiskt monterade.

Överföringsfunktionen fås då som:

$$G_{\text{term}} = \frac{K_3}{1 + \tau s}$$

För denna termistor gäller:

Insignal 1 °C ger utsignal 0.73 V.

Således:

$$K_3 = 0.73$$

Produkten av servots och mittpunktstermistorns överföringsfunktioner blir således:

$$\frac{K_1}{K_2} \cdot K_3 \cdot \frac{1}{16s^2 + 3.56s + 1}$$

eller med insatta siffervärden

$$\frac{0.73}{0.69} \cdot \frac{1}{16s^2 + 3.56s + 1}$$

Emellertid har enligt sid. 28 i återkopplingskretsen insatts en skalpotentiometer med värdet 0.69/0.73.

Det totala systemet för vilket stabilitetsundersökningen skall göras blir således:

$$G \cdot G_{\text{stav}}$$

där

$$G = \frac{1}{16s^2 + 3.56s + 1}$$

För den matematiska modellen av värmestaven gäller enligt laboration 2, sid. 7, med god noggrannhet vid höga frekvenser, följande överföringsfunktion för stavens mittpunkt:



$$G_{\text{stav}} = e^{-\sqrt{\frac{l^2}{8}}} \cdot e^{-i\sqrt{\frac{l^2}{8}}}$$

Ovanstående överföringsfunktion gäller för den matematiska modellen, där fysikaliska konstanter eliminerats. Vid numeriska beräkningar på denna överföringsfunktion skall därför verkliga frekvenser multipliceras med faktorn

$$\frac{l^2}{a}, \text{ där } \frac{l^2}{a} = 833.1 \text{ s} \text{ (Se sid. 9)}$$

För att bestämma den maximala förstärkningen vid proportionell återkoppling för systemet  $G \cdot G_{\text{stav}}$  kan på vanligt sätt Bode- och Nicholsdiagram användas. För att få ökad noggrannhet har emellertid här valts numeriska beräkningar, enligt nedanstående tabell, där för  $\omega_1$  och  $\omega_2$  följande samband råder:

$$\omega_1 = \frac{l^2}{a} \cdot \omega_2$$

$\omega_1$	$\omega_2$ (rad)	$\varphi_{\text{stav}}$ ( $^\circ$ )	$\varphi_G$ ( $^\circ$ )	$\varphi_{\text{tot}}$ ( $^\circ$ )
78.95	0.094762	-180.00	-21.50	-201.50
70.0	0.084022	-169.48	-18.63	-187.95
65.0	0.078020	-163.32	-17.10	-180.42
64.9	0.077902	-163.19	-17.07	-180.26
64.8	0.077818	-163.07	-17.05	-180.12
64.7	0.077662	-162.94	-17.01	-179.95

Ur ovanstående tabell beräknas medelst lineär interpolering:

$$\omega_1 = 64.73$$

$$\text{ger } \varphi_{\text{tot}} = -180.00^\circ$$

$$\omega_2 = 0.077698$$

För ovanstående värden på  $\omega_1$  och  $\omega_2$  beräknas:

$$10 \log |G_{\text{stav}}| = -1.23533$$

$$10 \log |G| = 0.02468$$

Härur fås:

$$10 \log |G_{\text{stav}} \cdot G| = -1.21065$$

Nyquistkriteriet ger:

$$10 \log K_{\text{max}} = -10 \log |G_{\text{stav}} \cdot G|$$

Härur fås:

$$K_{\text{max}} = 16.6$$

Experimentellt erhöles enligt sid. 41:

$$K_{\text{max}} = 17.5$$

Motsvarande värde då endast värmestaven beaktas är:

$$K_{\text{max}} = 23.2$$

Vi ser således att för maximal förstärkning vid proportionell återkoppling är den försämrade stabiliteten i huvudsak orsakad av temperaturservonans dynamik, samt termistorernas försärkning. Det är rimligt att antaga att så också är fallet vid andra typer av återkopplingar.

Att den experimentella förstärningen t.o.m. är något högre än den teoretiskt erhållna förefalla märkligt. Emellertid är mätningarna utförda inom ett litet temperaturintervall ( $1^{\circ}\text{C}$ ), vilket gör, att termistorresistansändringen endast är  $\approx 3.5\%$  av den absoluta termistorresistansen. Det experimentella resultatet är därför synnerligen beroende av en noggrann kalibrering av termistorerna.

Antag felet i termistorresistans är  $x\%$ .

Termistorresistansen vid referenstemperaturen är  $\approx 2000\Omega$ .

Felet blir således  $20x\Omega$ .

Termistorresistans ändringen inom temperaturintervallet  $1^{\circ}\text{C}$  är  $\approx 70\Omega$ .

Felet i termistorresistansändring blir i ogynnsammaste fall  $2 \cdot 20x = 40x$ .

Den totala förstärkningen för återkopplingskretsen blir inte

$$\frac{0.73}{0.69} \cdot \frac{0.69}{0.73}, \text{ d.v.s. } 1, \text{ utan i ogynnsammaste fall}$$

$$\approx \frac{0.70 - 0.40x}{0.70 + 0.40x} \cdot \frac{0.70}{0.70}$$

Den teoretiskt beräknade maximala förstärkningen blir då

$$16.6 \cdot \frac{0.70 + 0.40x}{0.70 - 0.40x}$$

Antag denna skall överensstämma med den experimentellt erhållna, nämligen 17.5.

Detta ger:

$$x \approx 0.05$$

Således blir felet i termistorresistans 0.5 ‰

## 7. STÖRNINGSINVERKAN PÅ STAVENS MITTPUNKT VID ÅTERKOPPLING

Denna undersökning är mycket snarlik den i kap. 6. Sålunda kan tidigare kopplingsschemata enligt detta kapitel bibehållas i huvudsak oförändrade. Då som störning valts ett temperatursteg, blir enda skillnaden att stegkretsen flyttas från vänstra till högra temperaturservot. I övrigt hänvisas för principschema, kopplingsschemata, skrivarinställning, termistorer mm., till kap. 6 sid. 28-33.

Det är uppenbart att denna typ av körning inte belastar temperaturservona i lika hög grad, som den i kap. 6. Temperatursteget har därför ånyo ökats till 5 °C.

Potentiometerlistor:

mät- termistor	steg	åter- koppling	vänster temp.servo	höger temp.servo
P47 0.9703 Q46 0.2035 Q48 0.2967	Q02 0.0305	Q08 1/T. Q09 K/100 Q15 K/100	P04 0.2000 Q03 0.2009 Q10 0.1000 Q12 0.0500 Q17 0.0100 Q19 0.0100	P33 0.2000 Q30 0.1000 Q31 0.1930 Q34 0.0500
svcp				
Q06 0.1000 Q07 0.0307 (0.0154)				

Resultatet av mätningarna finns presenterat i nedanstående diagram: Motsvarande kurvor för den teoretiska modellen är satta inom parentes.

diagram nr:

Proportionell (P) återkoppling	7.1	(2.10)
Integrerande (I) återkoppling	7.2	(2.11)
Proportionell och integrerande (PI) återkoppling	7.3-4	(2.12-13)

Kommentarer:

På grund av mätningarnas likhet med dem i kap. 6, är tidigare kommentarer på sid. 34 och följande i huvudsak tillämpbara. Speciellt gäller detta de låga värden på återkopplingsparametrarna, som även vid dessa mätningar föreligger.

## 8. SAMMANFATTNING

Arbetets syfte har huvudsakligen varit, att via mätningar verifiera den matematiska modellen för värmeutbredning i en rak, isolerad metallstav, samt undersöka inverkan av återkoppling från stavens mittpunkt.

Värmestaven var i vardera änden försedd med ett temperaturservo, vars uppgift var, att ge värmestaven ett fastställt temperaturreferensvärde, samt generera temperatursteg.

Styrningen av servona skedde medelst analogmaskin, via en spänningsförstärkare. För att öka servonas snabbhet återkopplades dessa medelst lokal PI-återkoppling. Genom att studera temperaturstegets utseende vid några olika värden på återkopplingsparametrarna, bestämdes lämpliga värden på desamma.

Som temperaturgivare användes termistorer.

Genom att utgå från det faktum, att då insignalen är ett temperatursteg, bör vid stationaritet temperaturen utefter staven falla linjärt, befanns ett lämpligt värde på referens-temperaturen vara  $24^{\circ}\text{C}$ , samt ett lämpligt värde på insignalens amplitud vara  $5^{\circ}\text{C}$ .

Stegsvarsanalys på öppna systemet verifierade i huvudsak de teoretiska beräkningarna. Dock befanns begynnelse- och sluttemperaturer avvika något från teorin, vilket efter en del undersökningar antogs bero på, att kalibreringen av termistorerna inte varit tillräckligt noggrann.

För att erhålla en utsignal från stavens mittpunkt, som i görligaste mån följde den pålagda insignalen, återkopplades staven medelst P,I resp. PI-återkoppling. De principiella egenskaperna för dessa återkopplinstyper verifierades. Dock var systemet mindre stabilt, jämfört med vad som teoretiskt kunde förväntas. En undersökning visade, att denna stabilitetsförsämring, var orsakad av dynamiken hos temperaturservon och termistorer.

För att undersöka systemets förmåga att vid återkoppling eliminera störningar, genererades medelst högra servot en stegstörning, medan mittpunkten återkopplades till vänstra servot. Jämfört med nyss nämnda undersökning, var således enda skillnaden, att genereringen av temperatursteget överfördes från vänstra till högra servot. Mätningarna gav också principiellt jämförbara resultat, bl.a. vad beträffar den försämrade stabiliteten.

För att kunna jämföra de experimentella mätningarna med de teoretiska beräkningarna, kördes också samtliga undersökningar separat på analogmaskin. Dessa resultat är emellertid en approximation av verkligheten. Överföringsfunktionen för värmestaven har nämligen ett oändligt antal poler, medan vi för att kunna realisera systemekvationerna på analogmaskin har approximerat överföringsfunktionen med åtta poler.

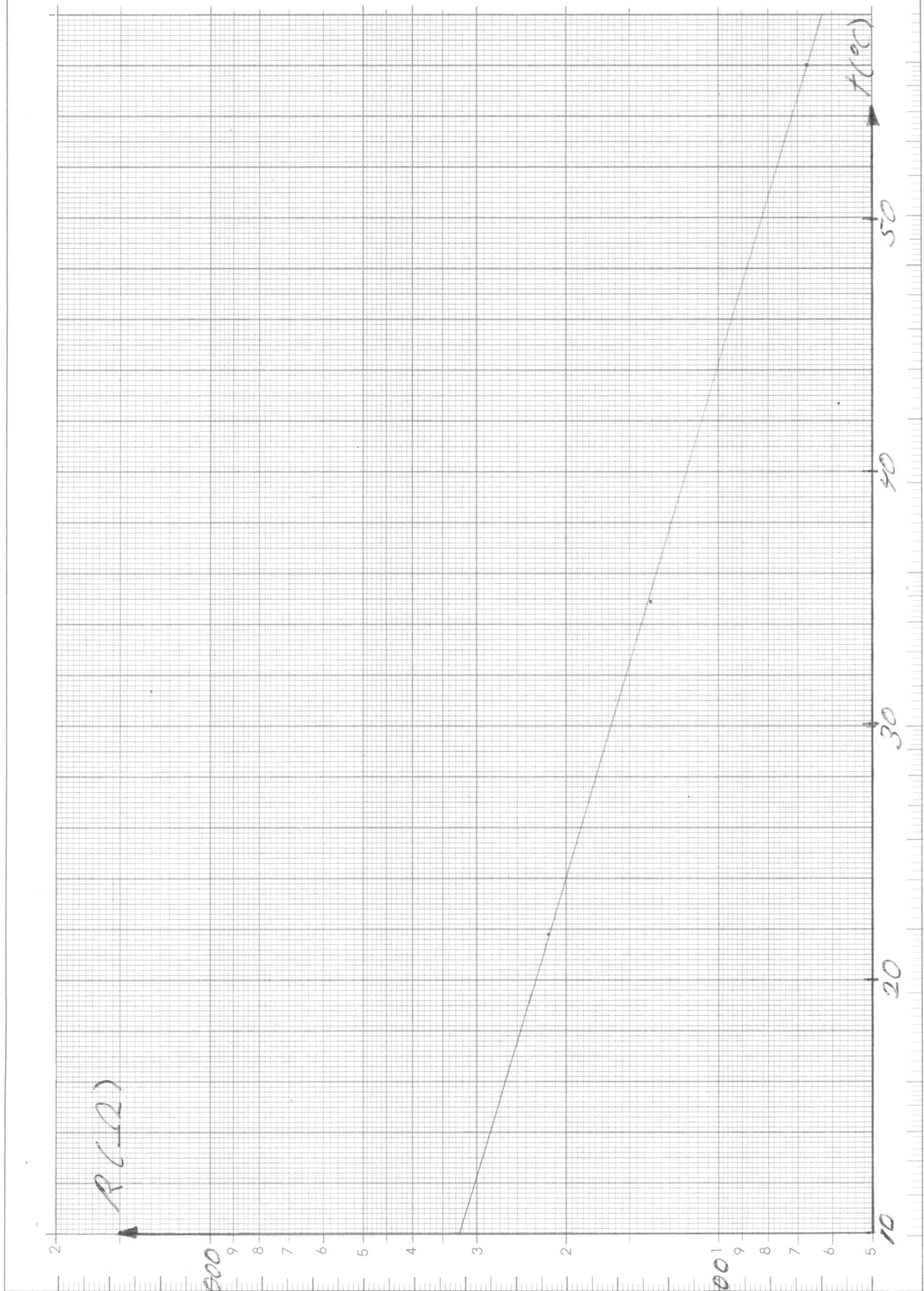


## 9. REFERENSER

- (1) Laboration nr 2 i reglerteknik AK höstterminen 1967.  
reglerteknik, LTH
- (2) B. Ekstrand, L-E Larsson, "Studium av system för  
temperaturreglering".  
Examensarbete i reglerteknik, LTH
- (3) R.W. Haruff, "Linear temperature scales from thermistor  
sensors".  
Yellow Springs Instrument Co.
- (4) Broschyr från Siemens, "Sirigor-Kühlblöcke".
- (5) Broschyr från Hafo, "Termistorer".
- (6) Carl-Erik Fröberg, "Lärobok i numerisk analys".  
Svenska Bokförlaget/Bonniers 1962.
- (7) B. Häggman, "Kompendium i analogmaskiner".  
reglerteknik, LTH 1967

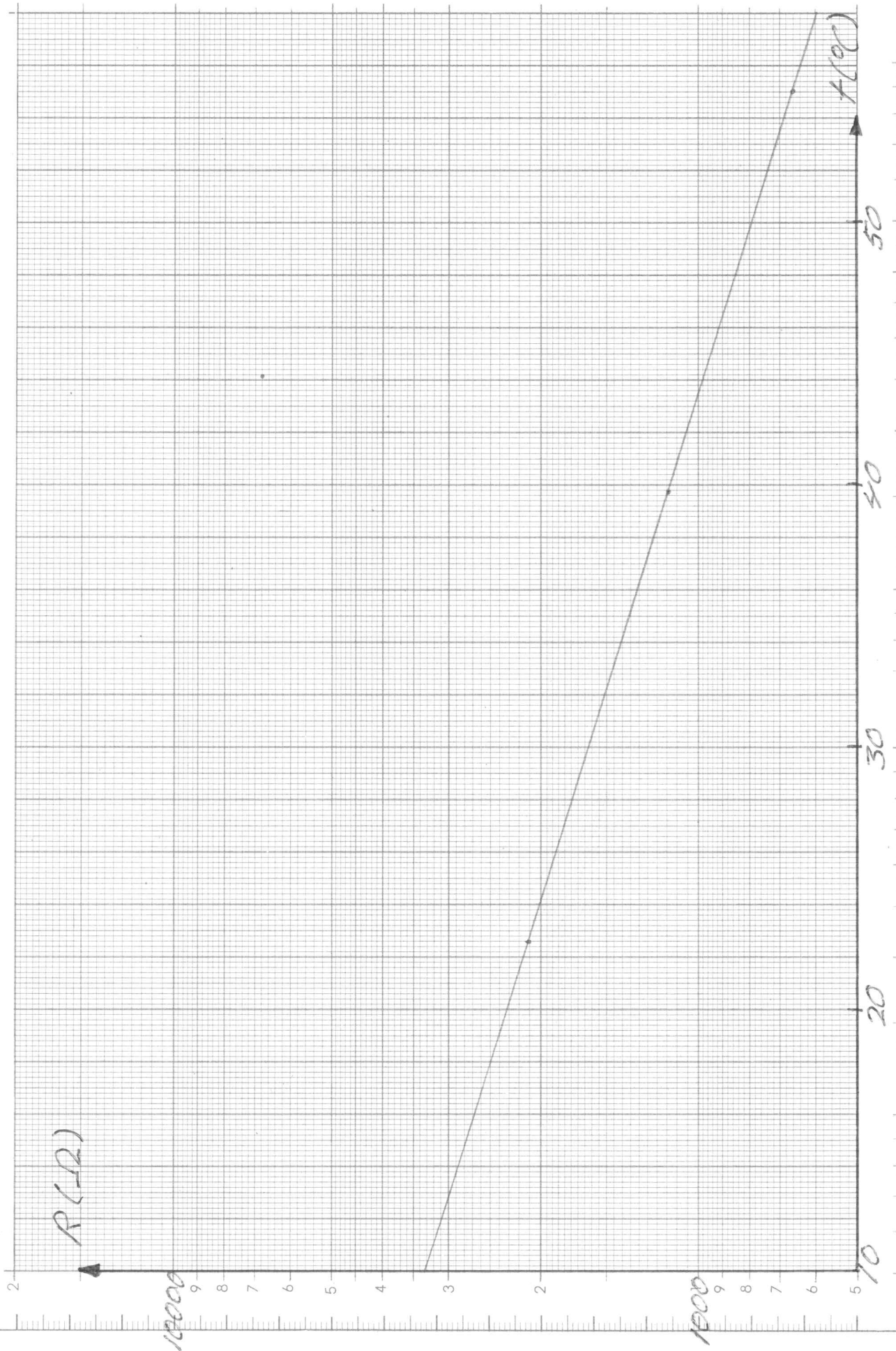
Termistor 1  
Karakteristik

Diagram  
1.2.1



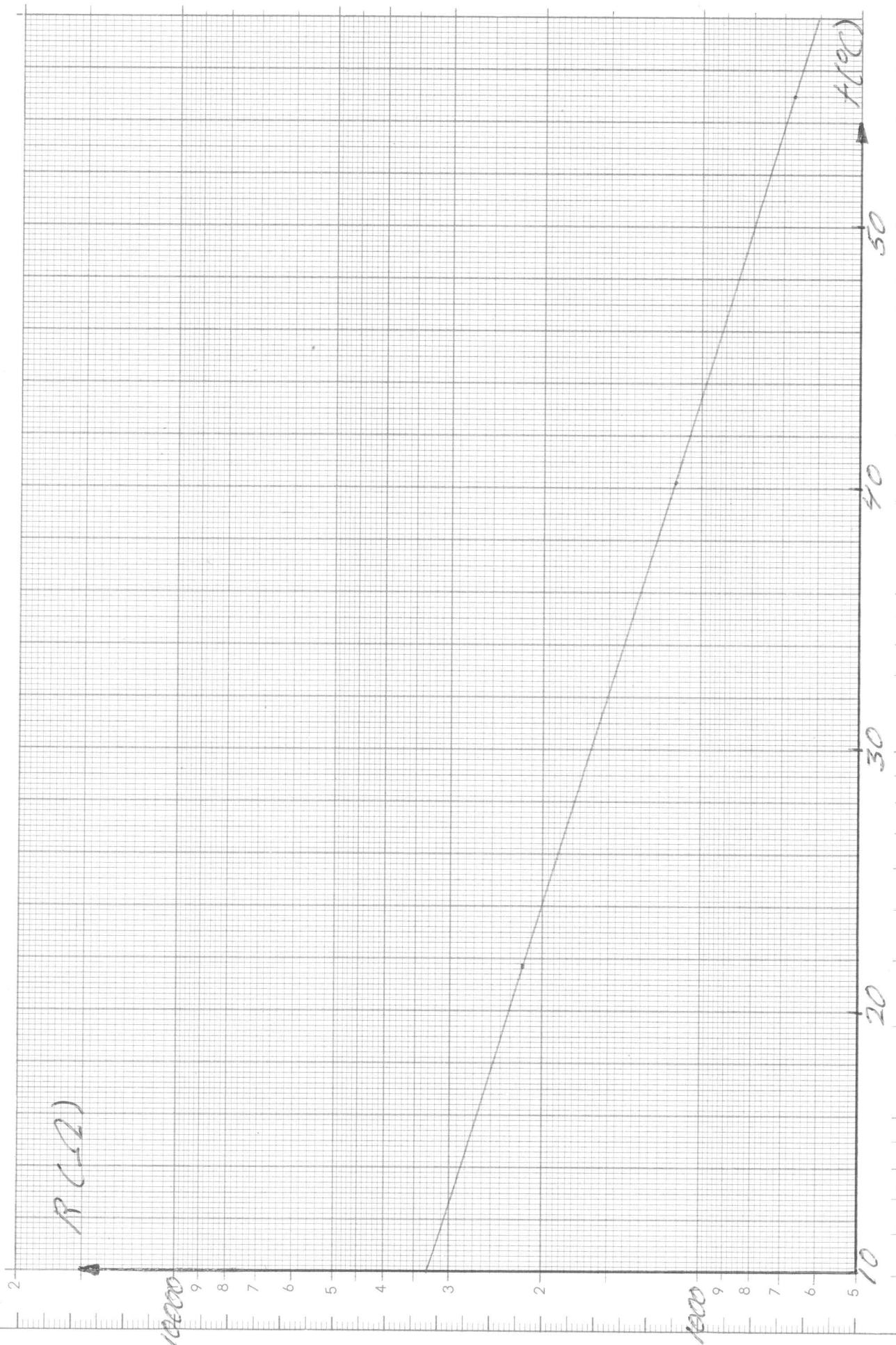
Termistor 2  
Karakteristik

Diagram  
1.2.2



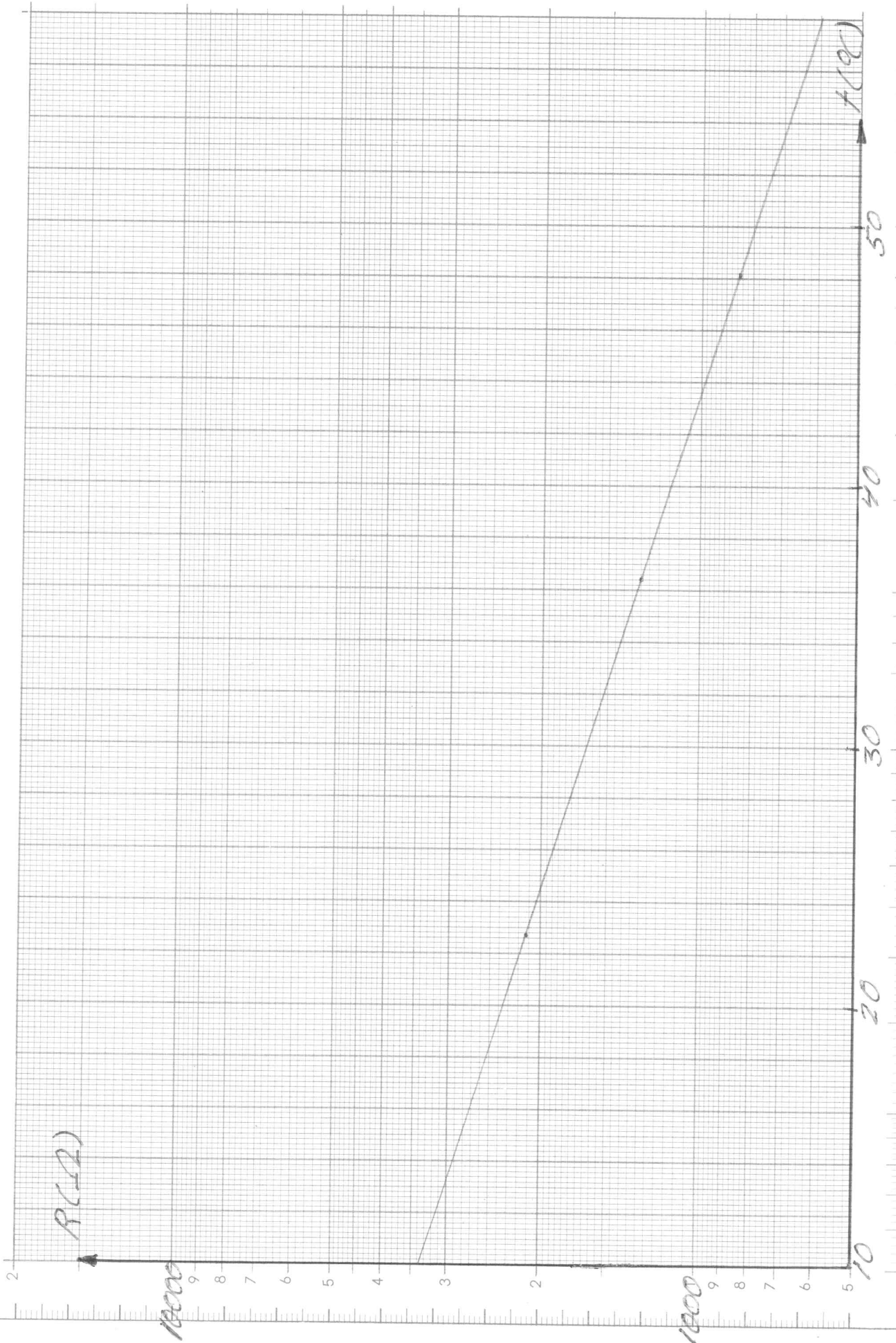
Termistor 4  
karakteristik

Diagram  
1.2.4



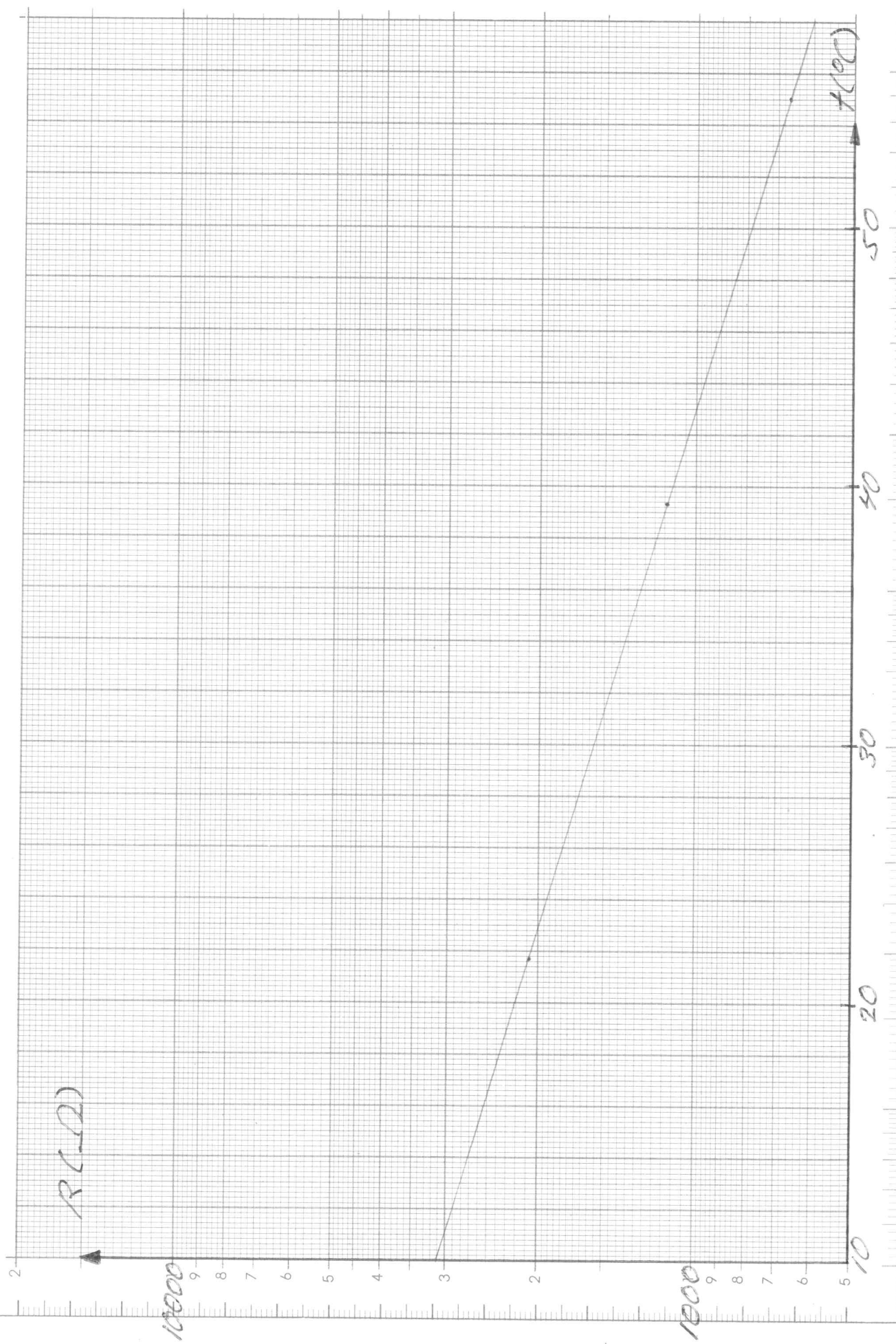
Termistor 5  
Karakteristik

Diagram  
1.2.5



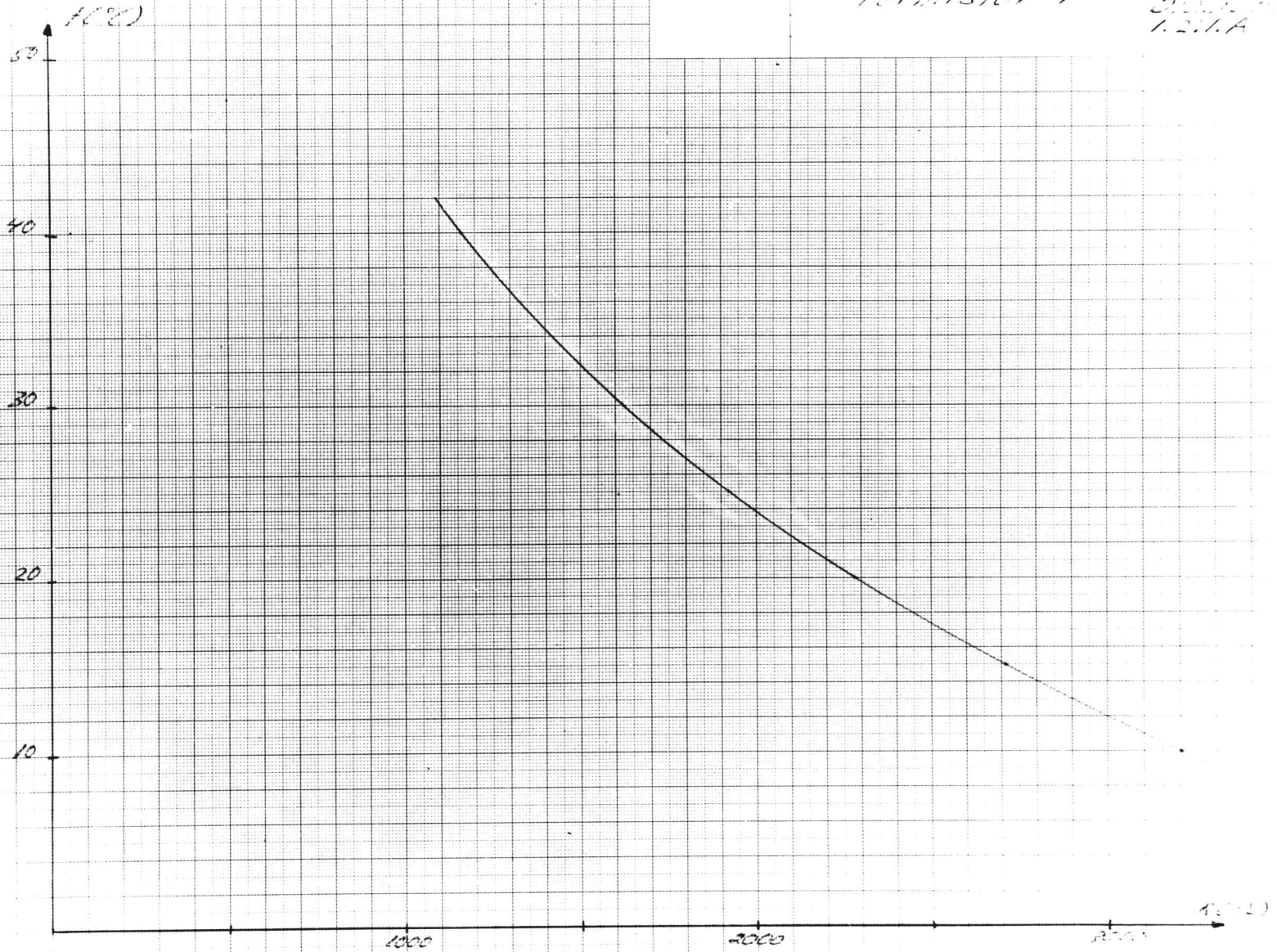
Termistor 3  
Karakteristik

Diagram  
1.2.3



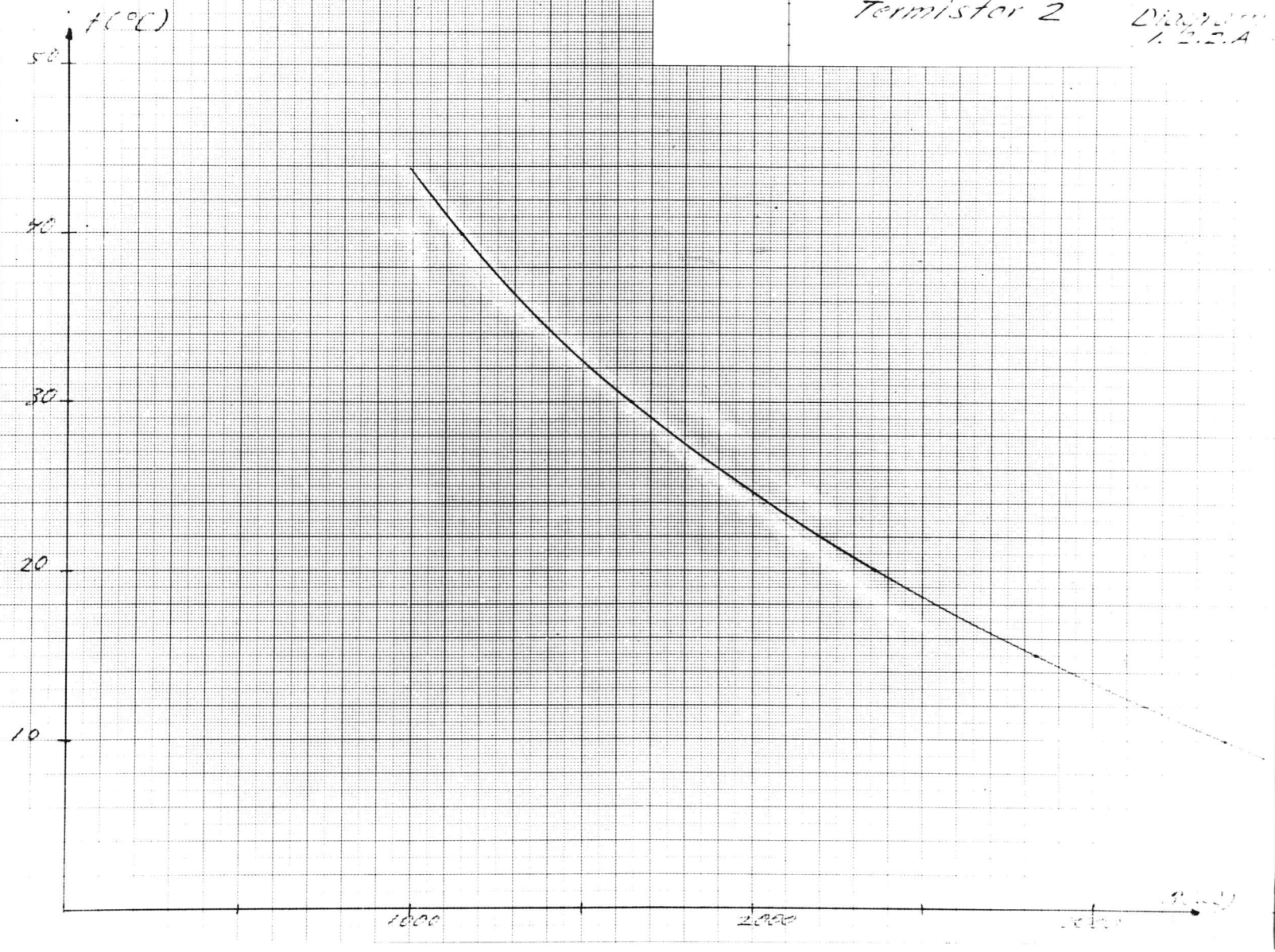
Termistor 1

0.25V  
1.2mA



Termistor 2

Diagram  
1.3.2.A





Termister 3

Diagram  
1.2.3.A

$T(^{\circ}C)$

50

40

30

20

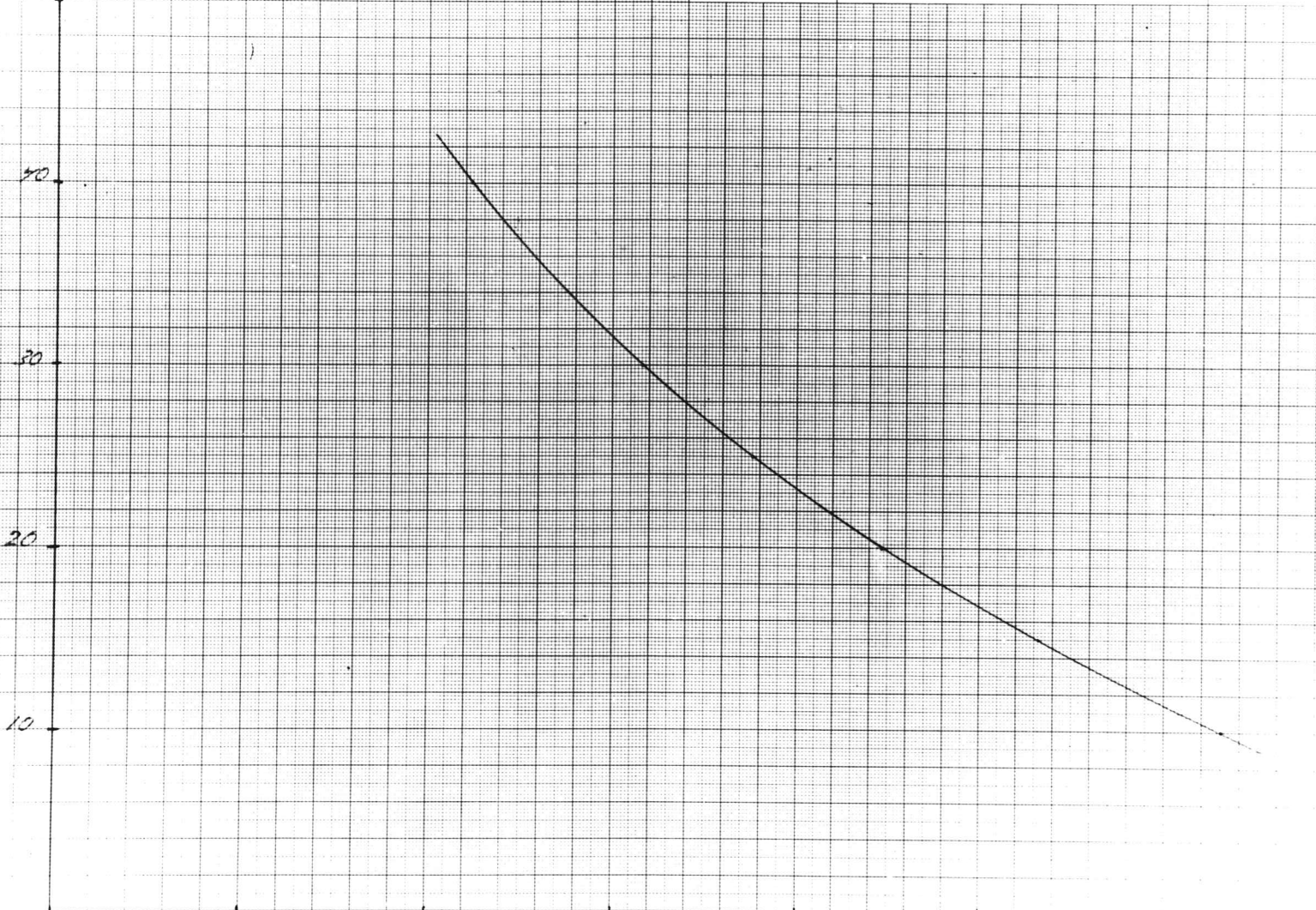
10

1000

2000

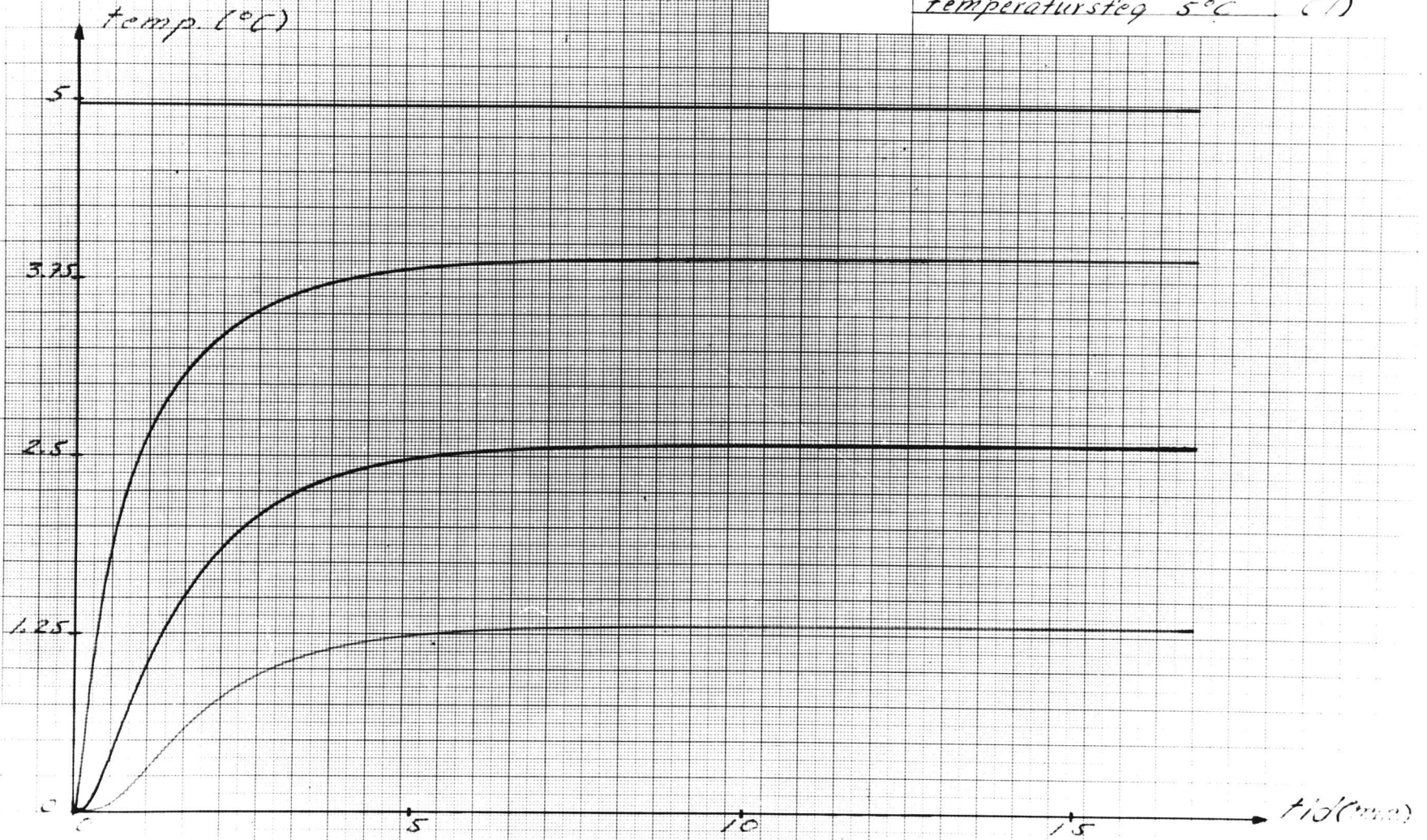
3000

$R(\Omega)$

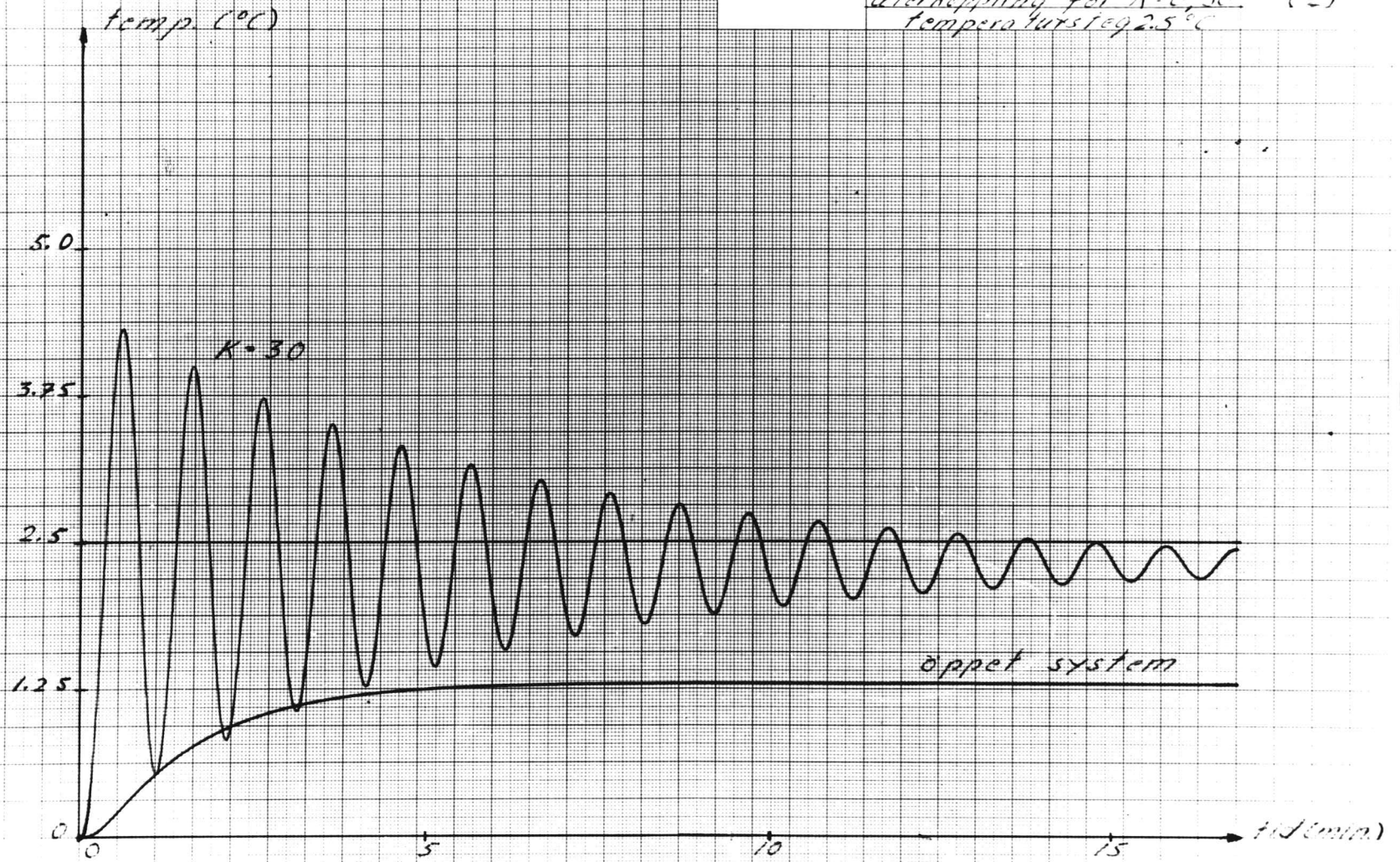


Graph showing the relationship between Resistance  $R(\Omega)$  (X-axis) and Temperature  $T(^{\circ}C)$  (Y-axis). The curve shows a non-linear, decreasing relationship between resistance and temperature.

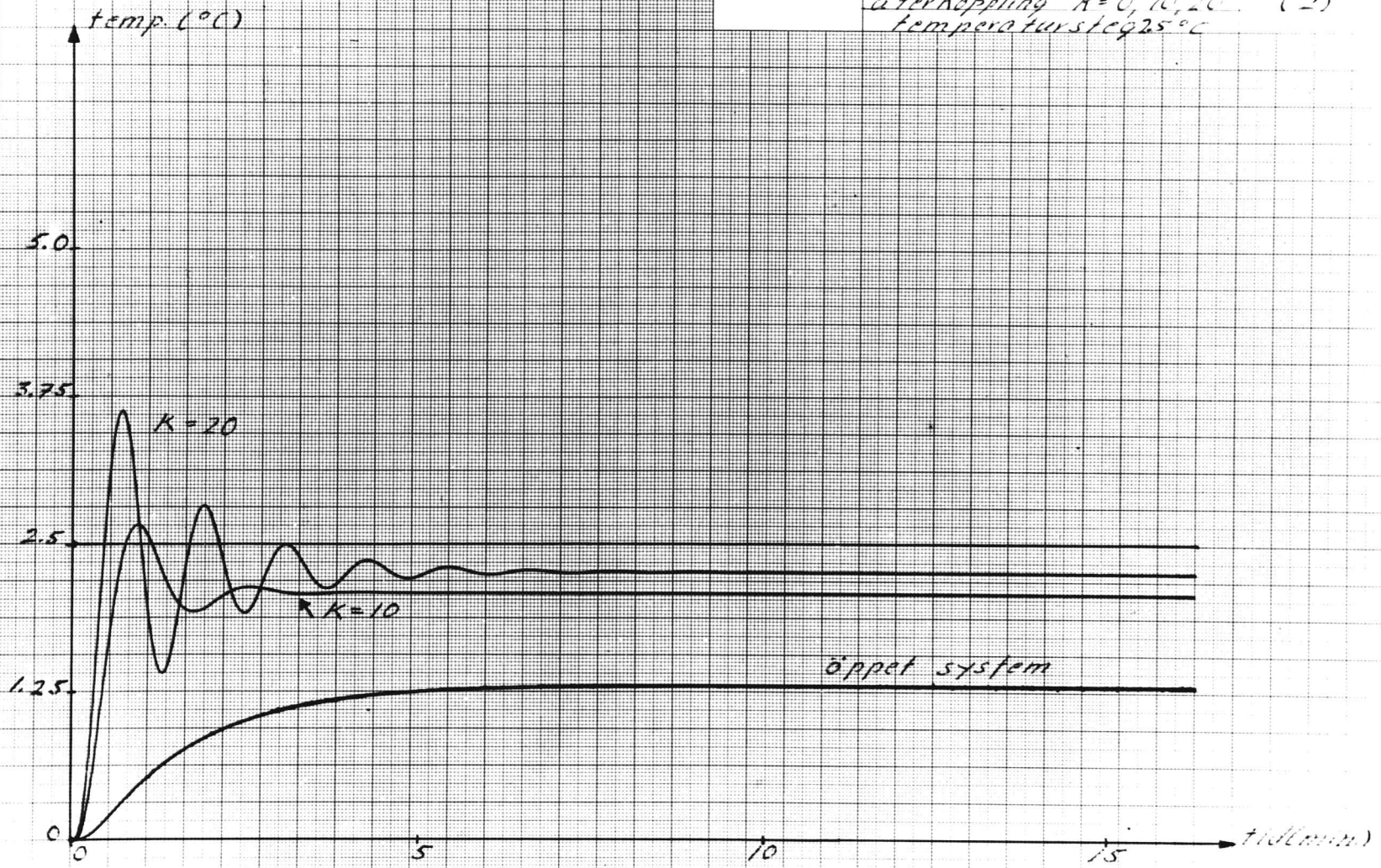
stepsvar för det öppna värmesystemet  
skivan för gitter p.k.t. 2,4,6. 2.1  
temperatursteg  $5^{\circ}\text{C}$  (1)



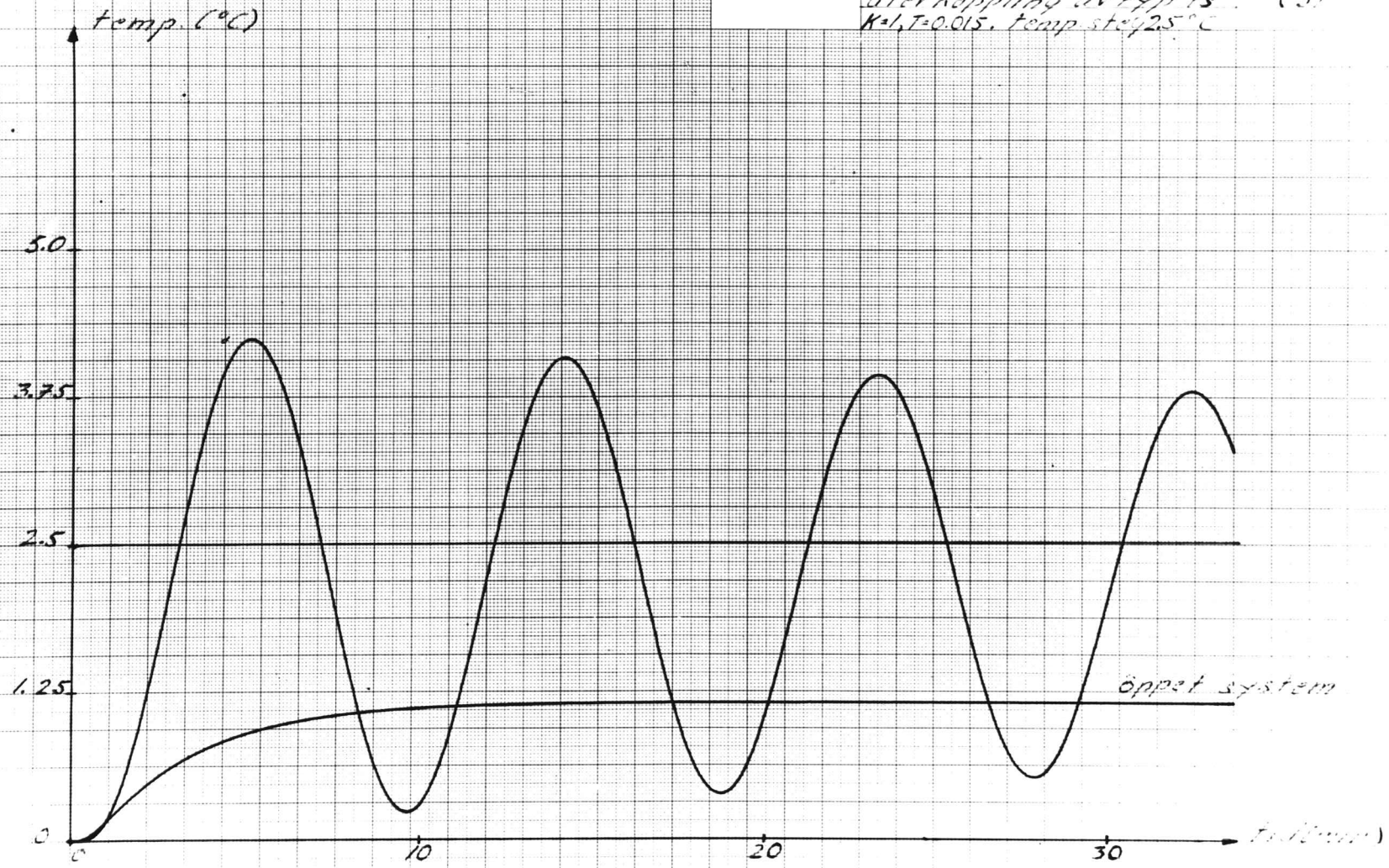
Stegsvär i stovens mitt-  
punkt vid proportionell  
återkoppling för  $K=0,30$  (2)  
temperatursteget  $2,5^\circ\text{C}$



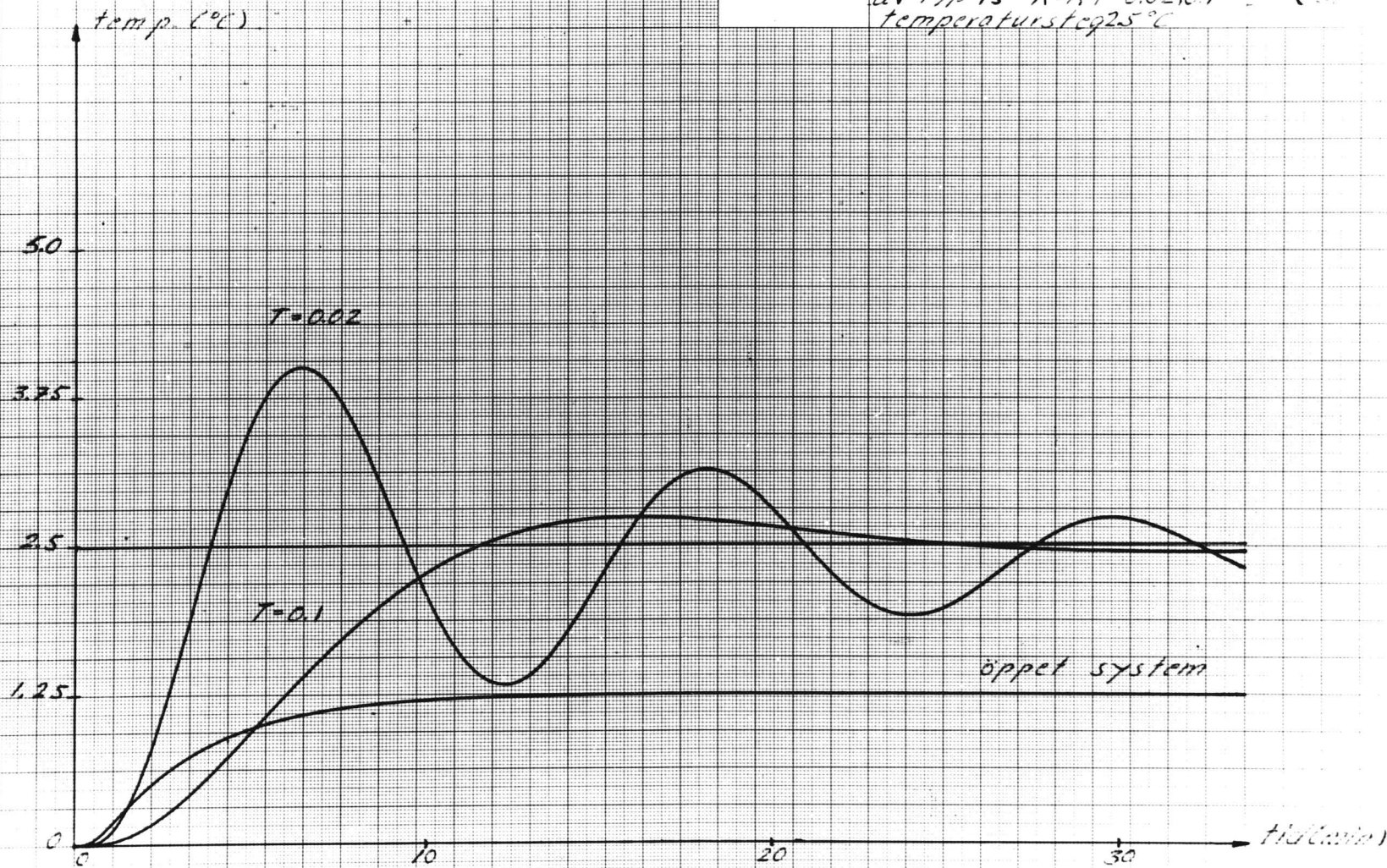
stegsvar i stenens mitt - Diagram  
punkt vid proportionell 2/3  
återkoppling  $K=0, 10, 20$  (2)  
temperatursteg  $25^\circ\text{C}$



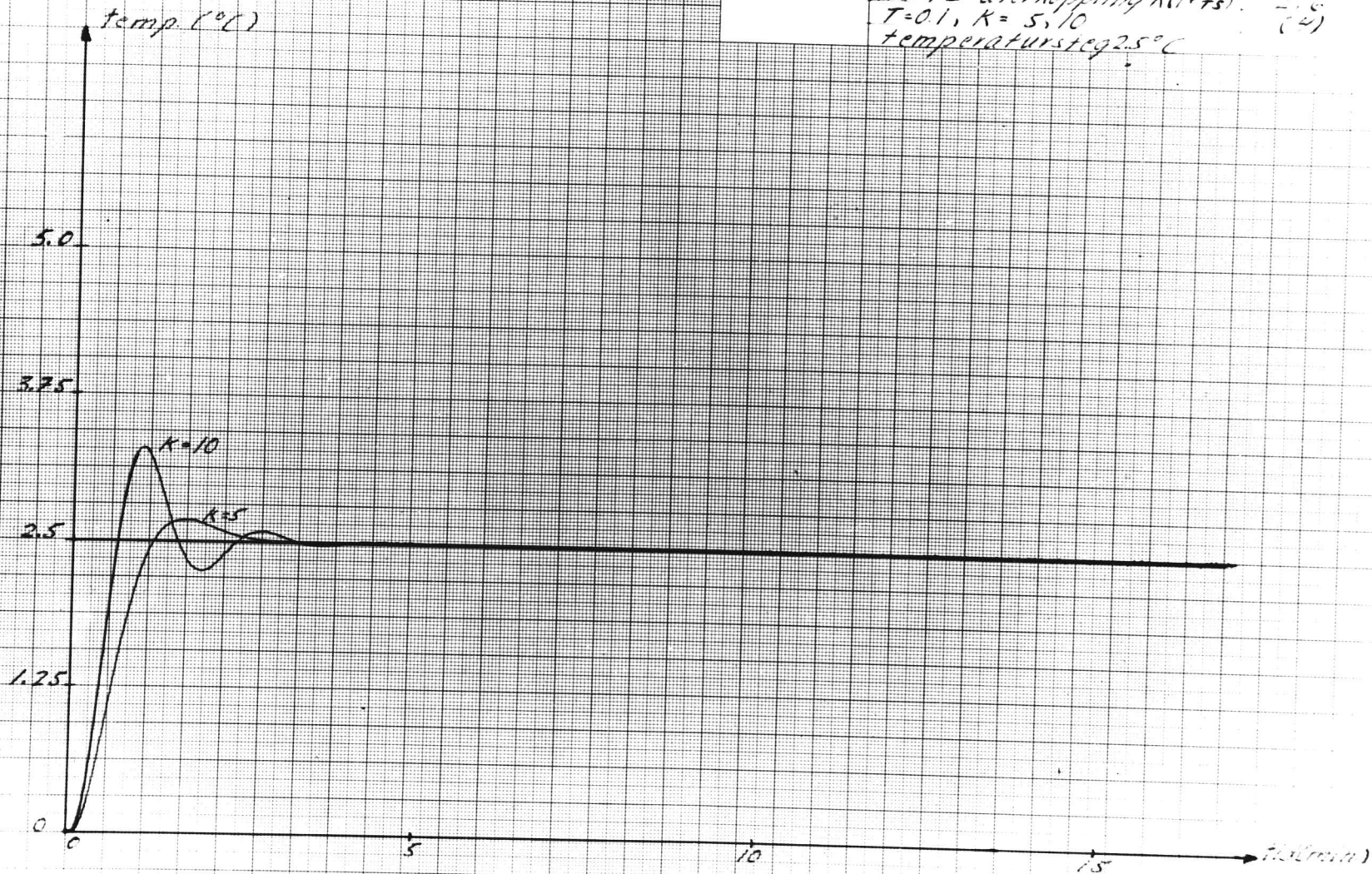
stegsvar i stavens mitt-  
punkt vid integrering.  
öterkoppling av typ  $\frac{1}{s}$ . (3)  
 $K=1, T=0.015$ , temp steg  $25^\circ\text{C}$



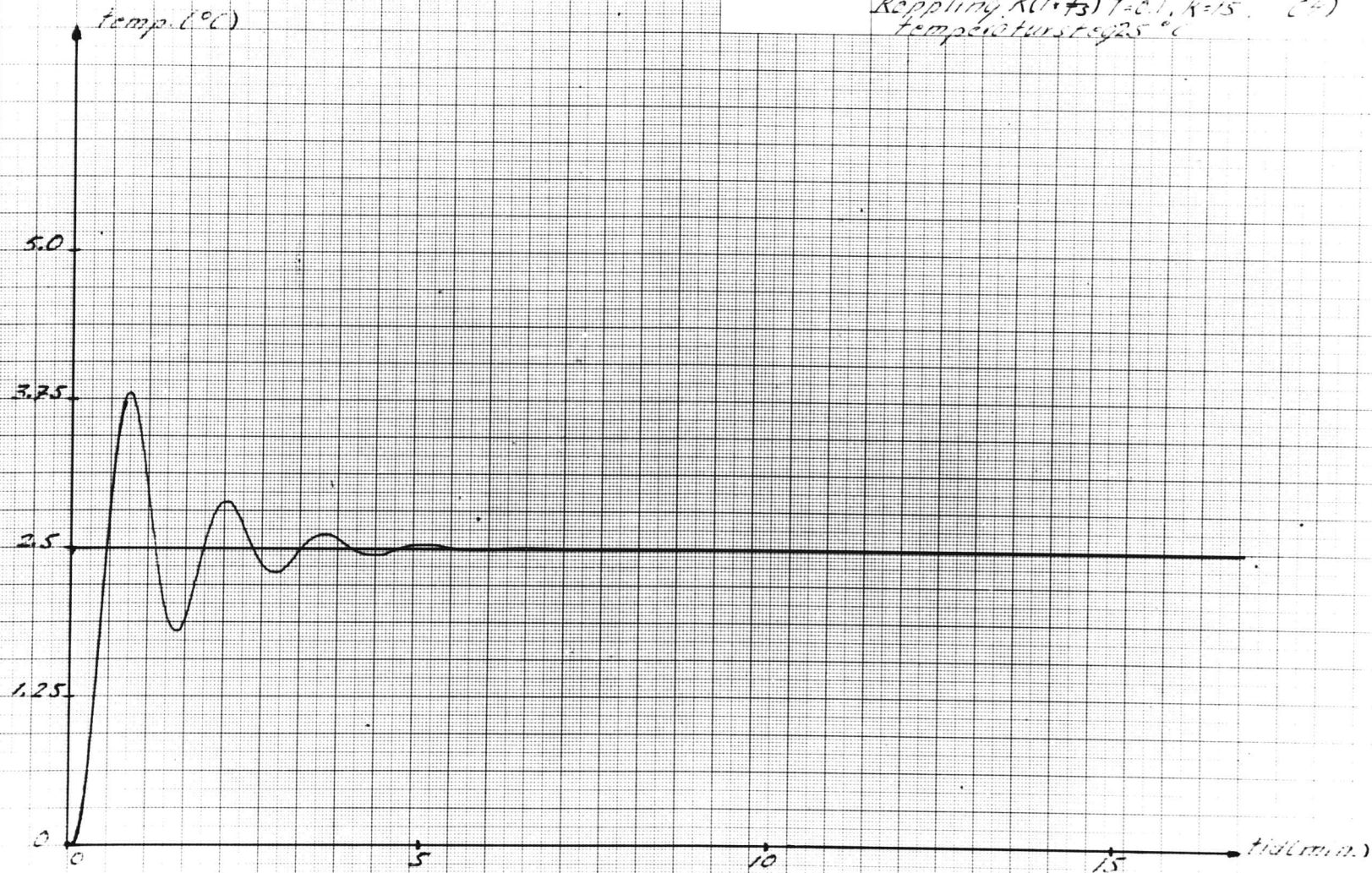
stegsvar i stavens mittpunkt. Diagram  
vid integrerande återkoppling.  $K=1, T=0.02, 0.1$   
av typ ~~3~~ (3)  
temperatursteg  $25^\circ\text{C}$



Stegsvär i stovens mittpunkt. D: 200 mm  
vid PI-återkoppling  $K(1+Ts)$ .  $T=0.1$ ,  $K=5, 10$   
temperatursteg  $2.5^\circ\text{C}$

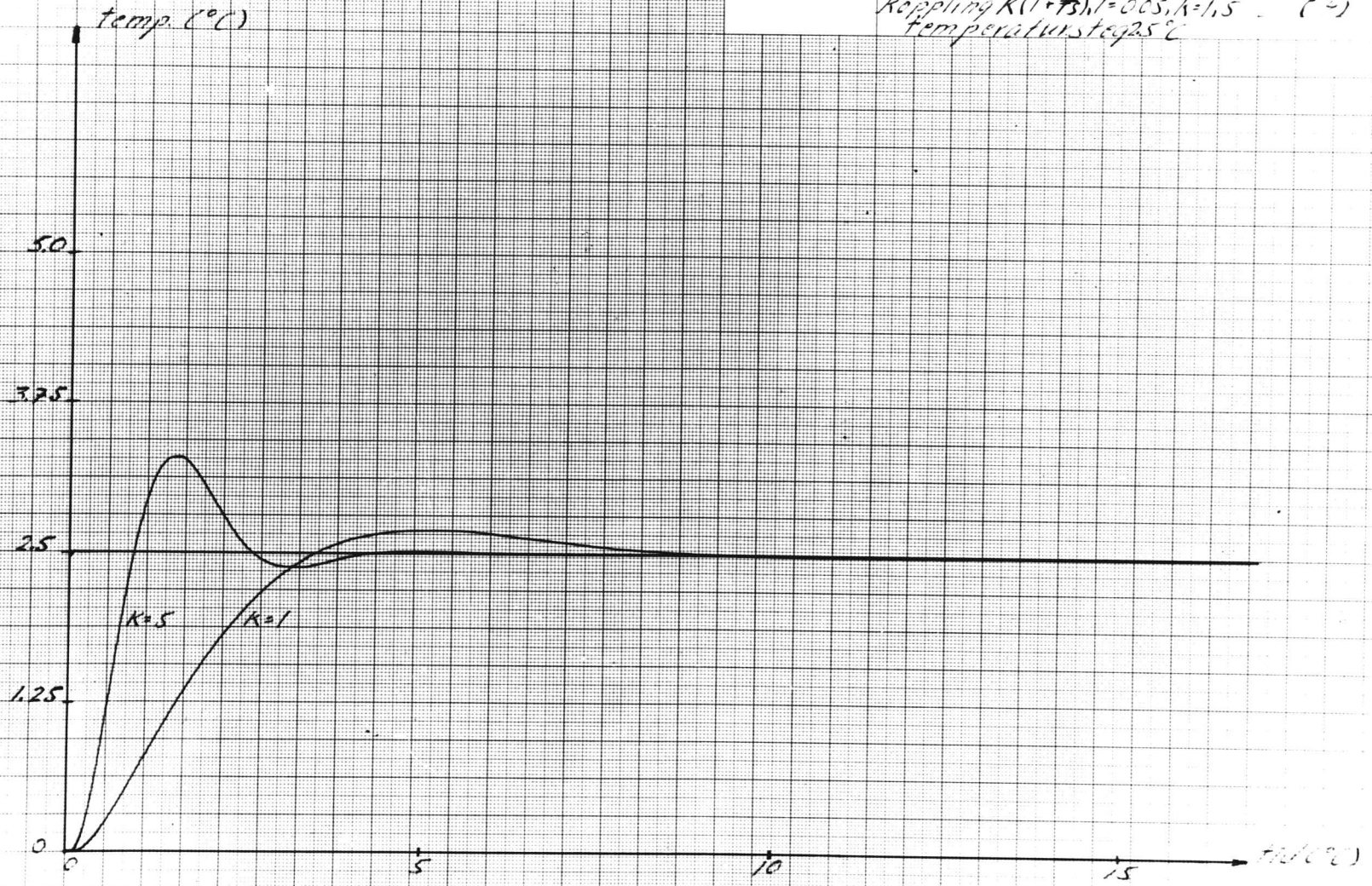


Stegsvartstovens mitt- Diagram  
punkt vid PI-Strer  
Regpling  $K(1 + \frac{1}{Ts})$   $T=0.1, K=15$  (24)  
temperatursteg  $5^\circ C$

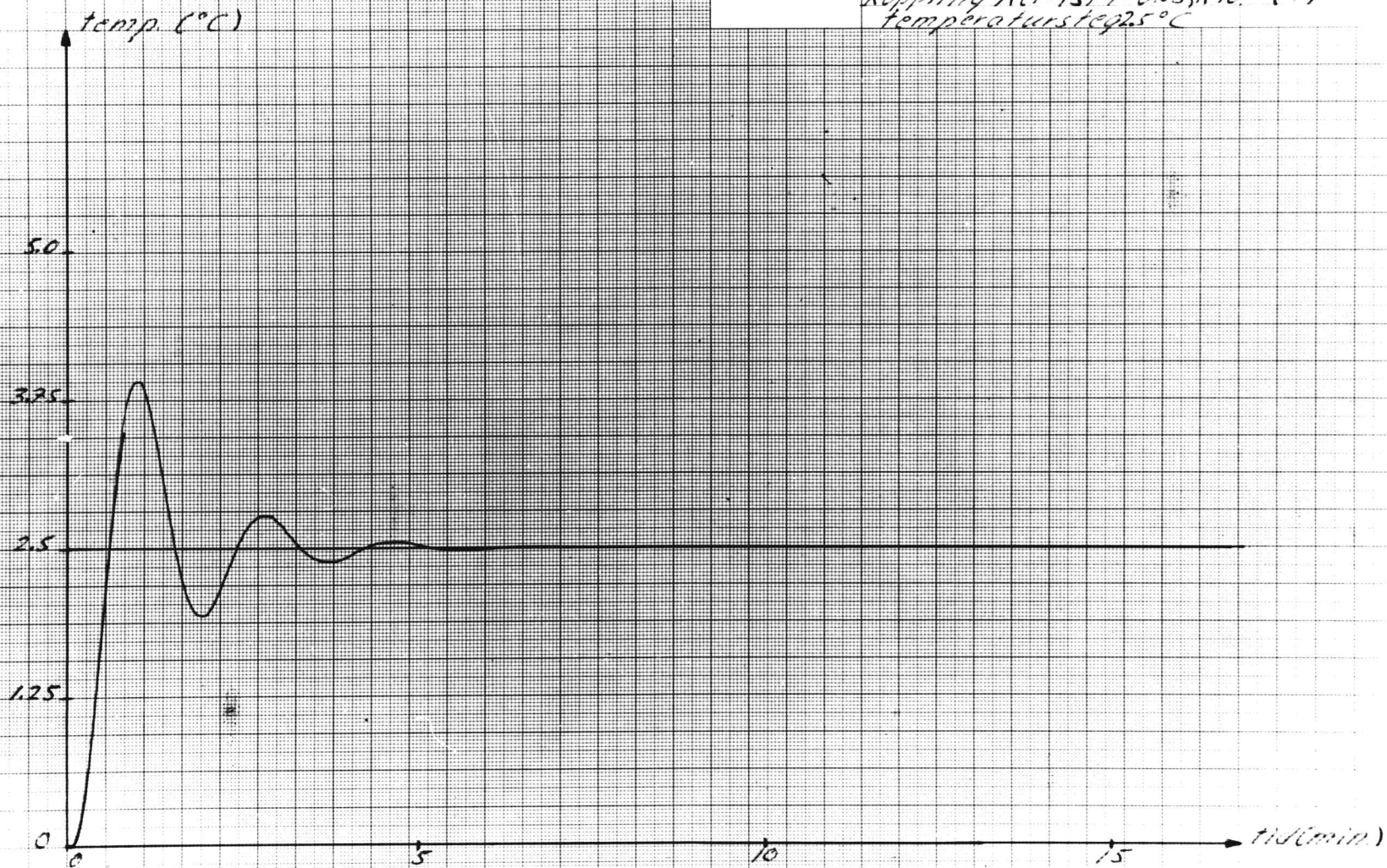




Stegsvar i stavens mitt - Diagram  
punkt vid  $P_2$ -ster-  
koppling  $K(1+Ts)T=0.05, k=1.5$  (-)  
temperatursteg  $25^\circ\text{C}$

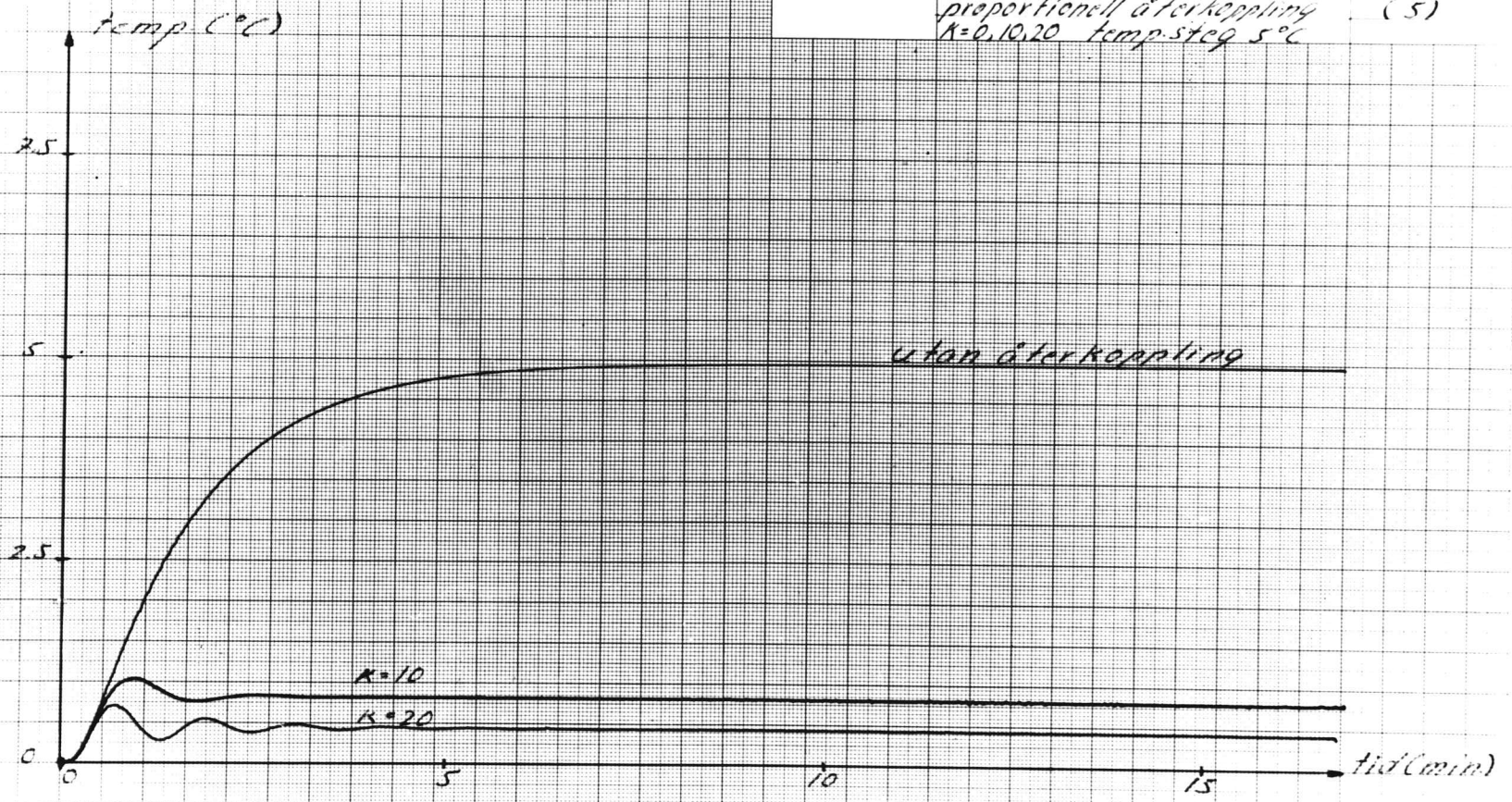


Stegsvar i stovens mitt- Diagram  
punkt vid PI-åter- 2,7  
koppling  $K(1+Ts)$   $T=0,05, K=10$  (4)  
temperatursteg  $5^\circ\text{C}$

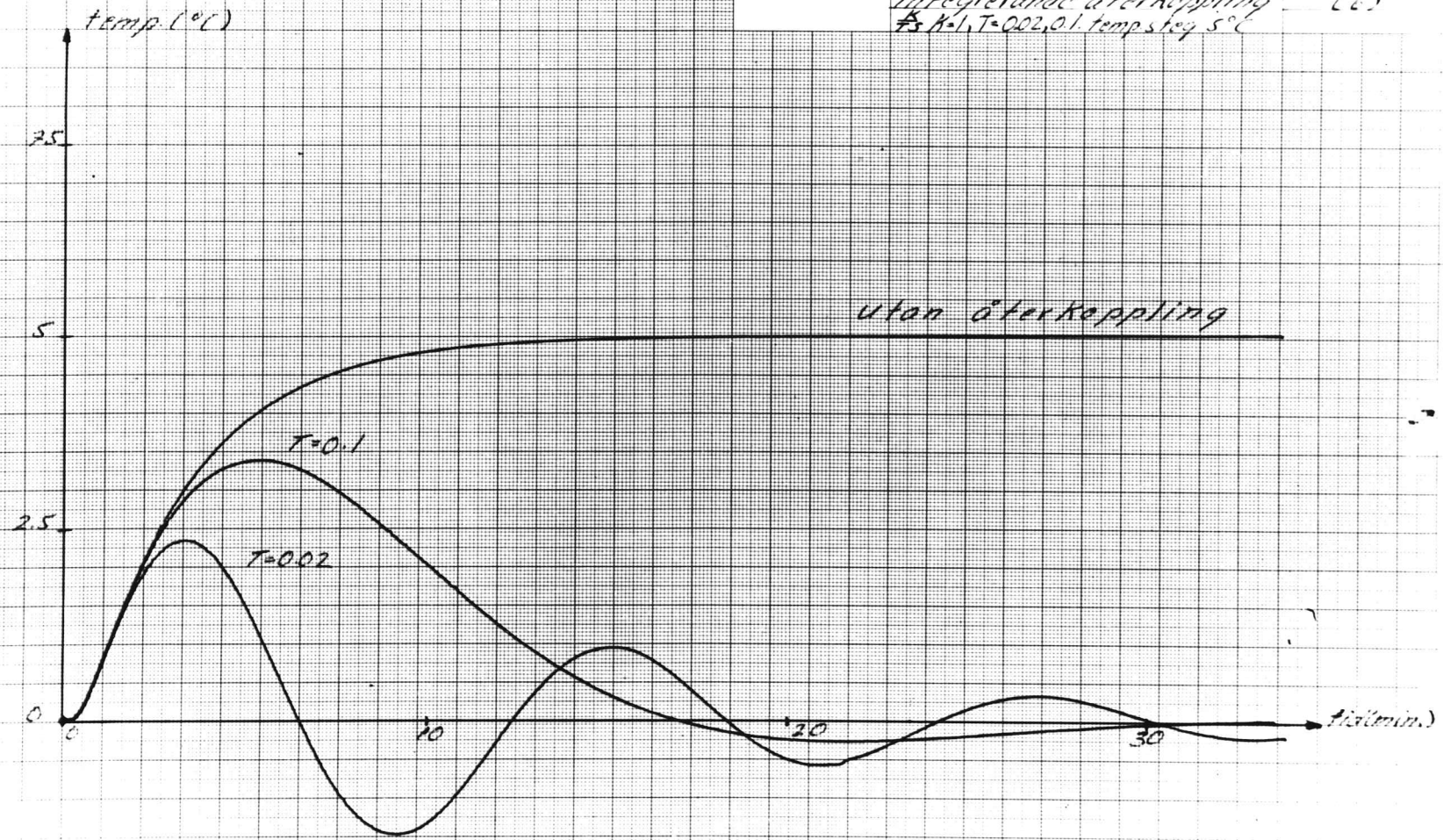


Stegstörningens inverkan  
på mittpunkten vid  
proportionell återkoppling  
 $K=0, 10, 20$  temp-steg  $5^\circ\text{C}$

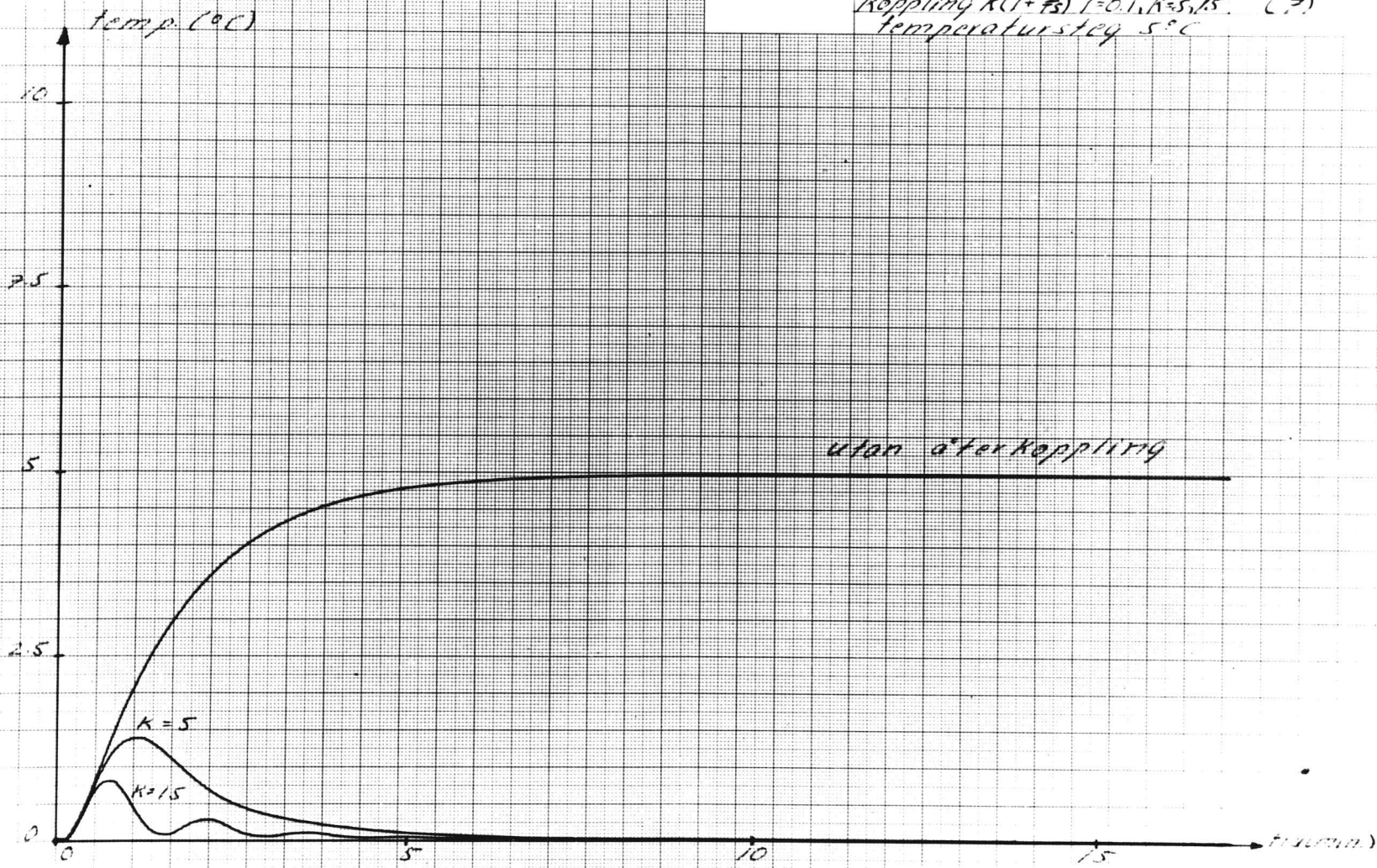
Diagram:  
2:10  
(5)



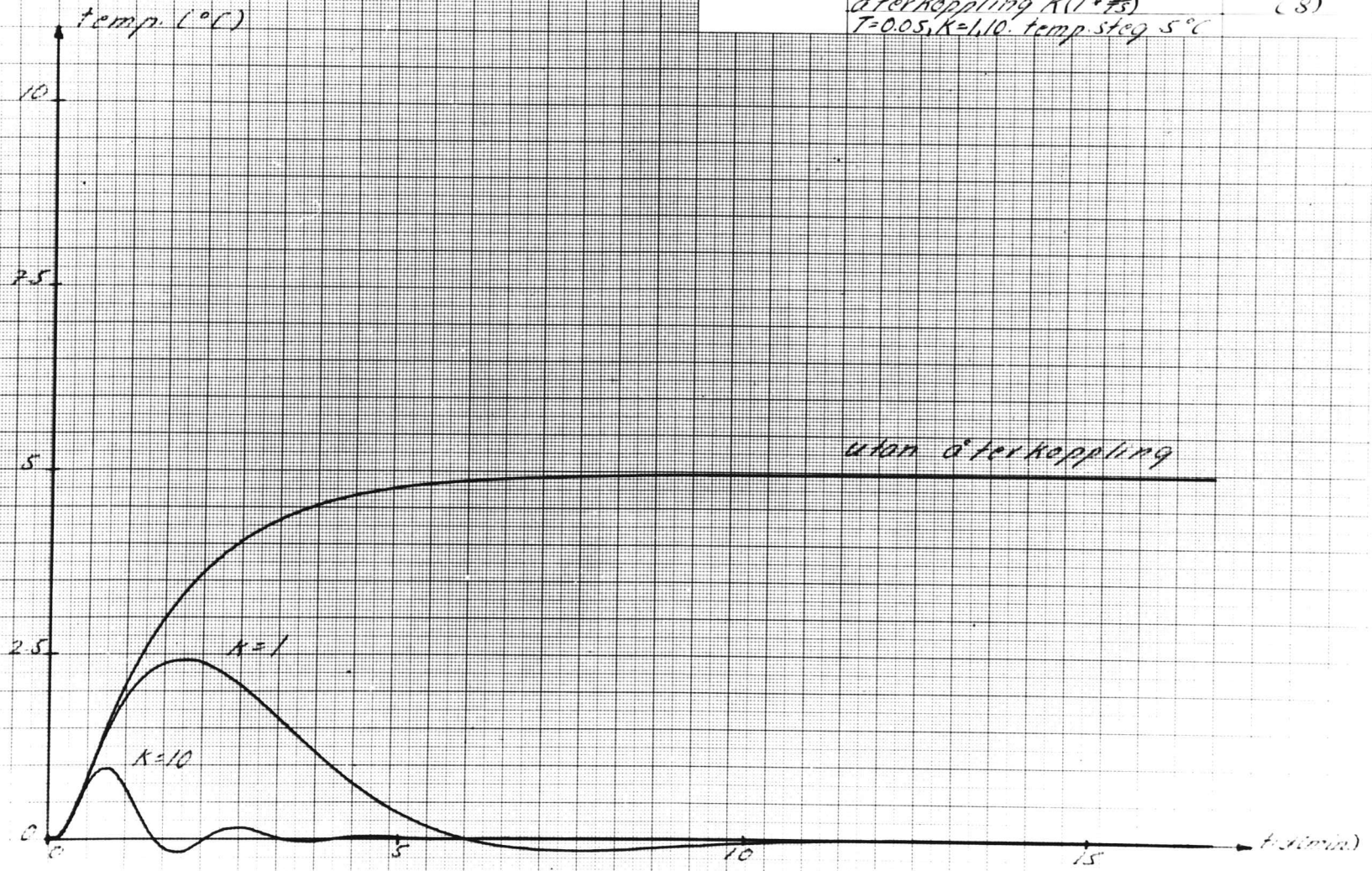
Stegförmingens inverkan Diagram  
på mittpunkten vid  
integrerande återkoppling (6)  
 $K=1, T=0.02, 0.1$  temp steg  $5^\circ\text{C}$



Stegstörningens inverkan - Diagram  
på mittpunkten vid PI-ster. 2/12  
koppling  $K(1 + T_s)$   $T=0.1, k=5, 15$ . (7)  
temperatursteg  $5^\circ\text{C}$

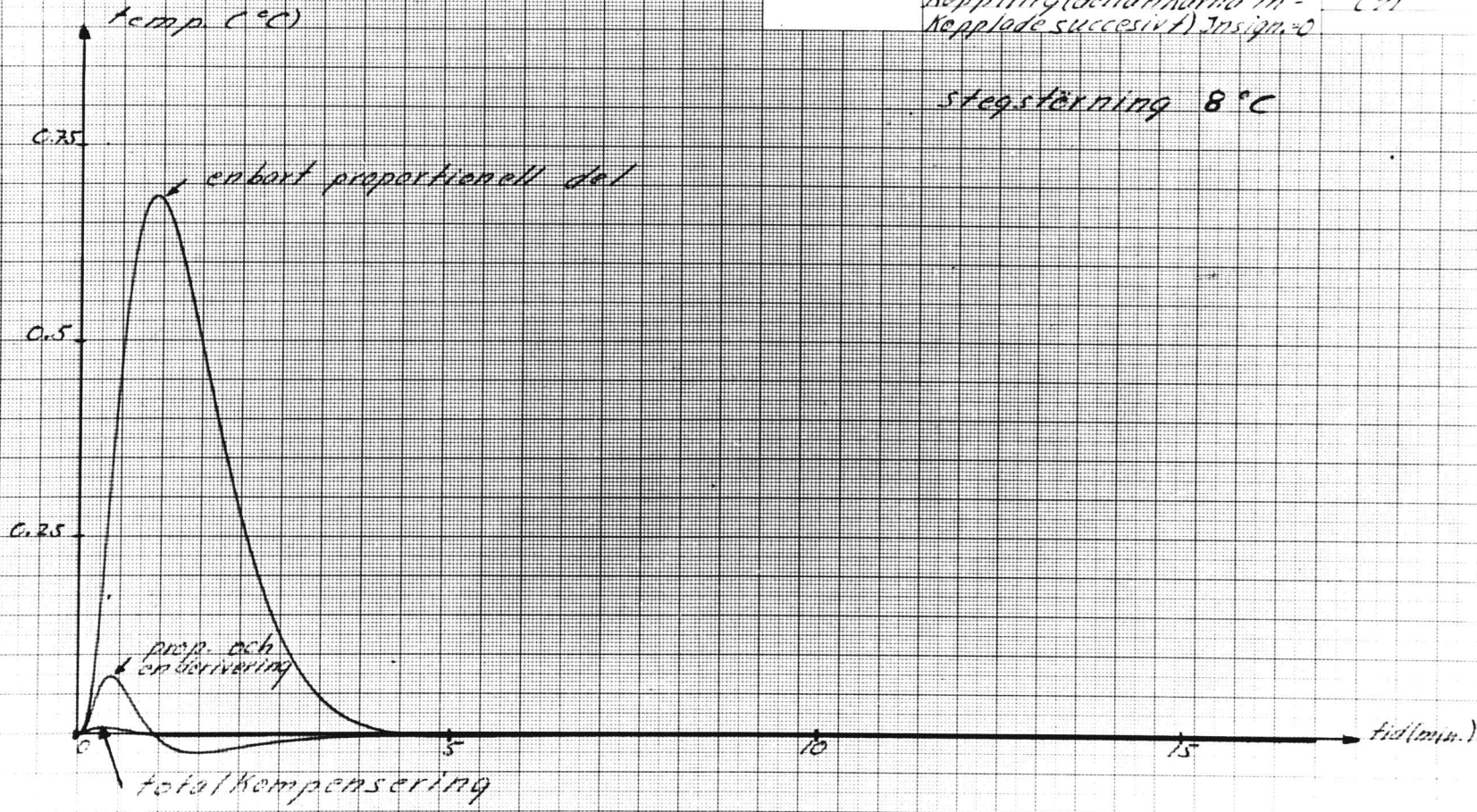


stegförningens inverkan Diagram  
på mittpunkten vid PI- 2/3  
återkoppling  $K(1/s)$  (8)  
 $T=0.05, K=1.10$ . temp steg  $5^\circ\text{C}$



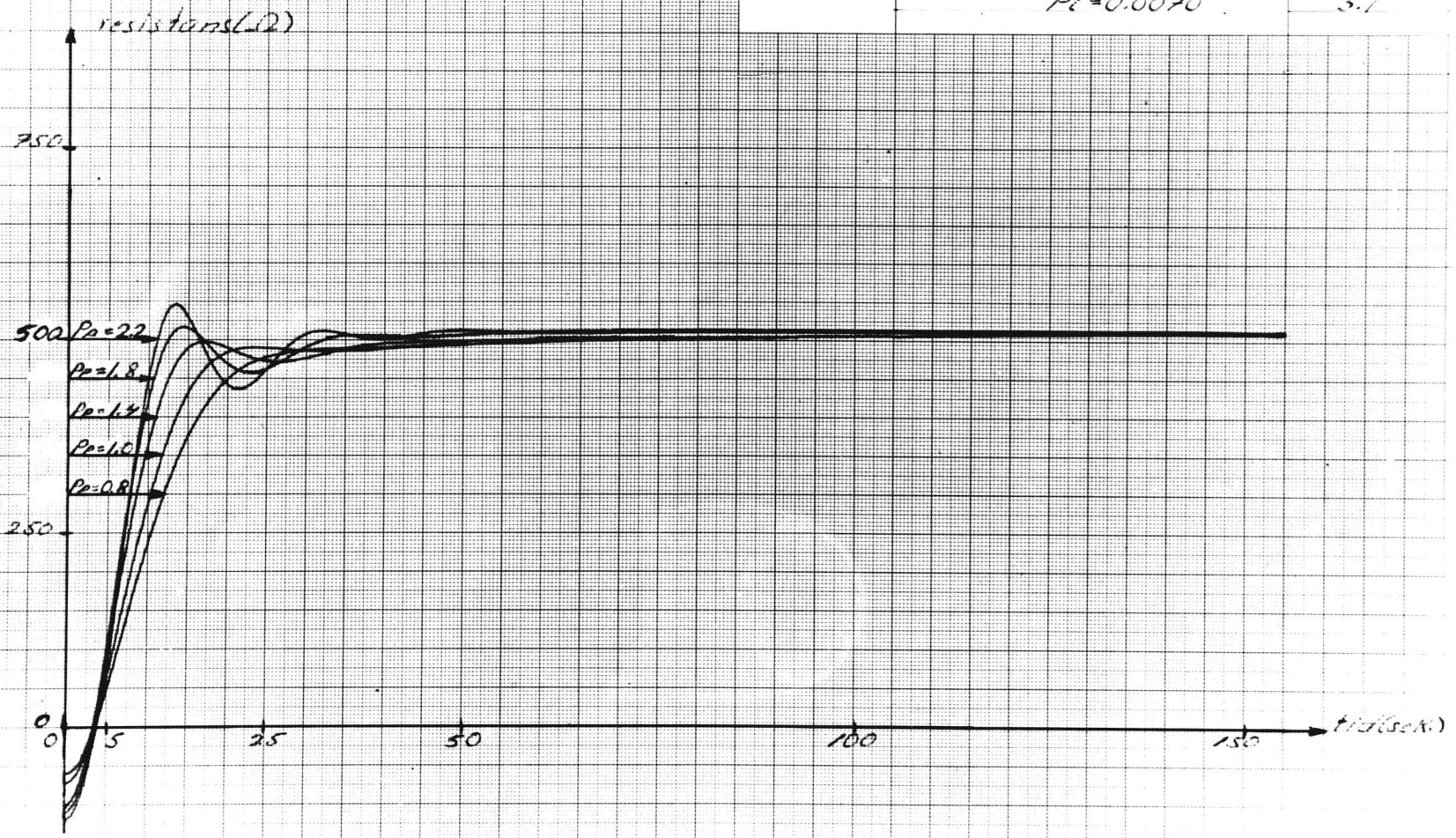
Stegstyrningens inverkan på Diagram  
mittpunkten vid framför -  
koppling (dellänkarna in -  
kopplade succesivt) Insign: 0

stegstyrning 8°C



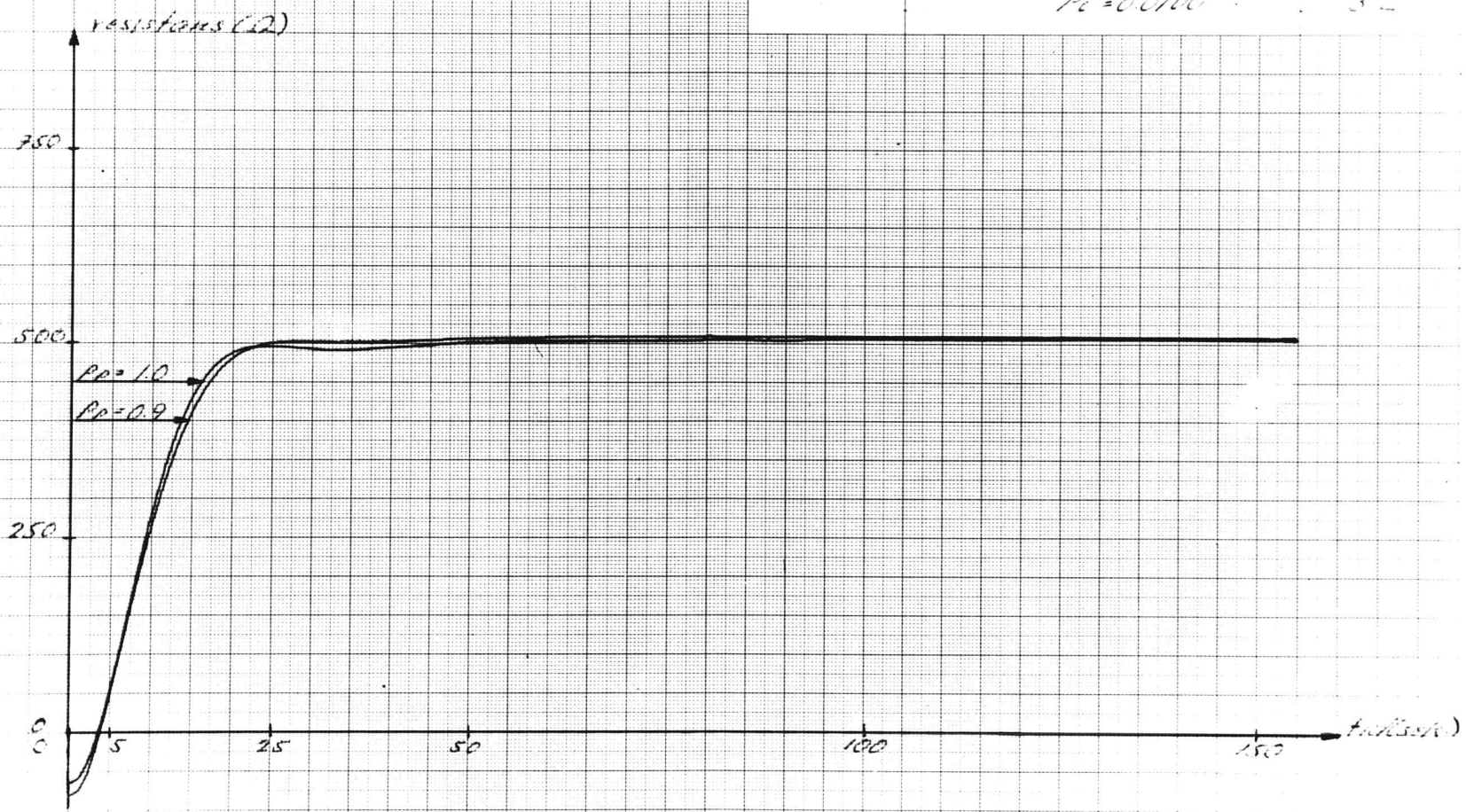
Inställning av PI-reg.  $P_i = 0.0070$

Diagram 3.1

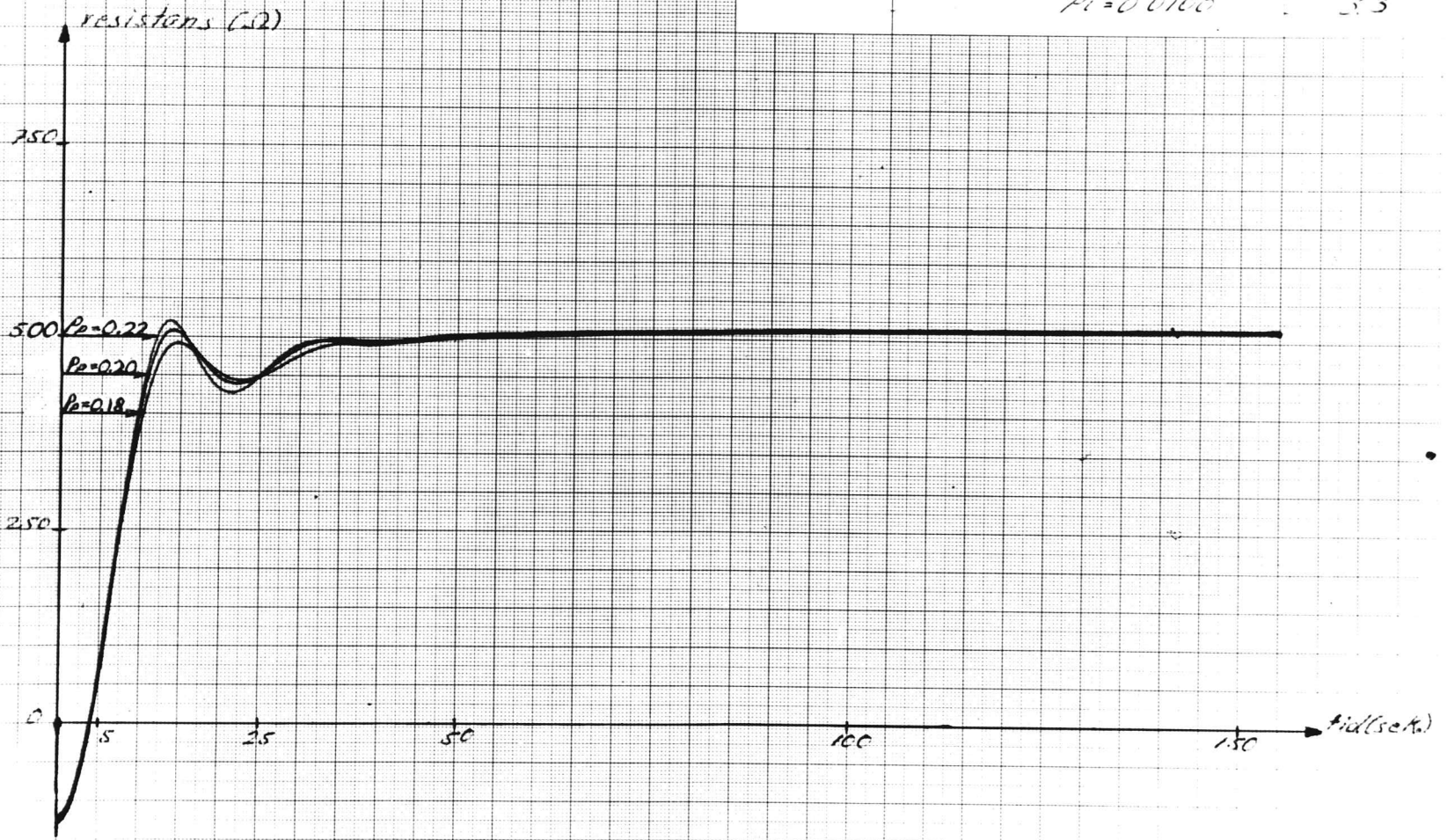




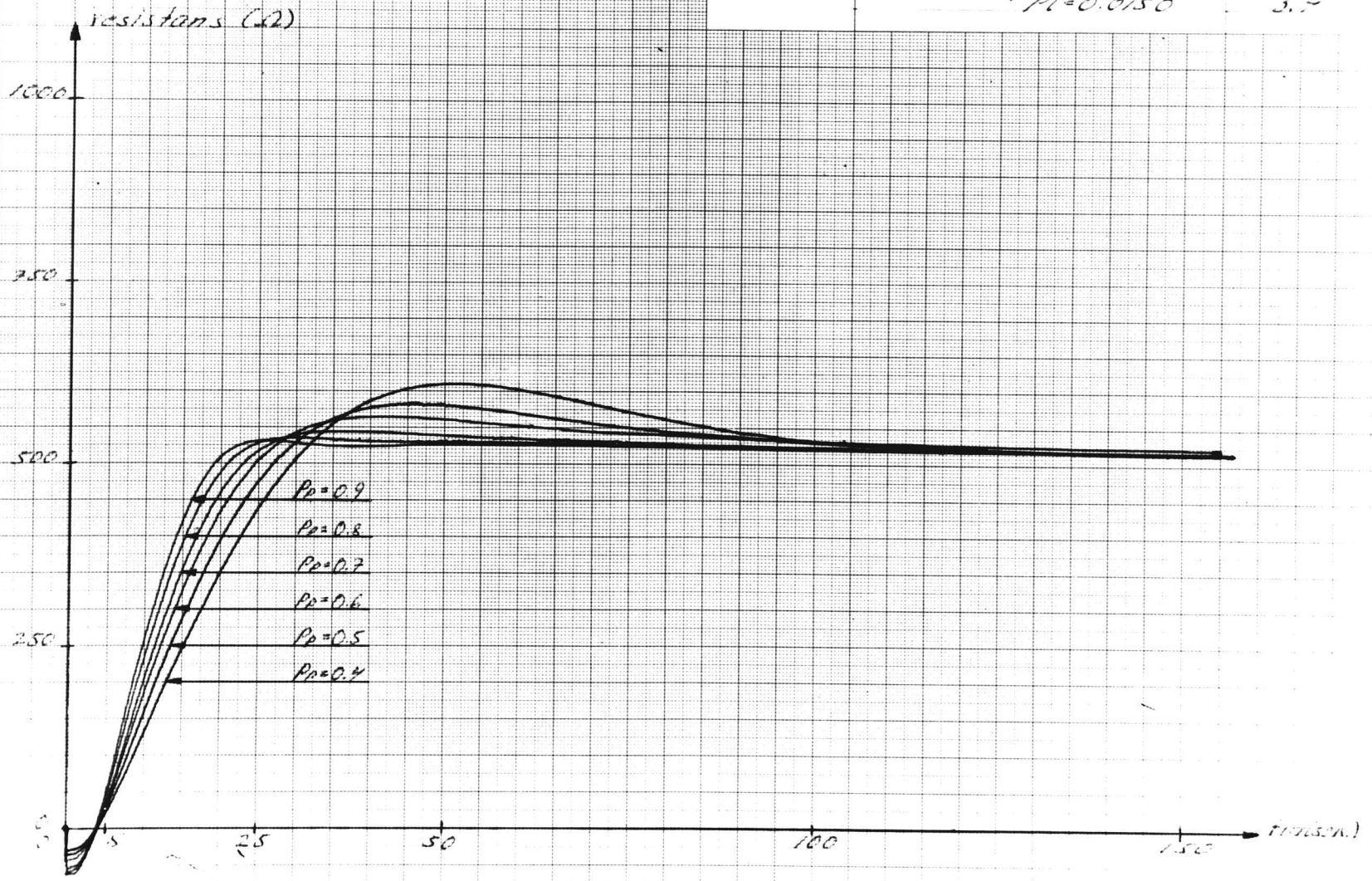
Inställning av PI-reg. 21.2.2011  
 $P_i = 0.0100$  32



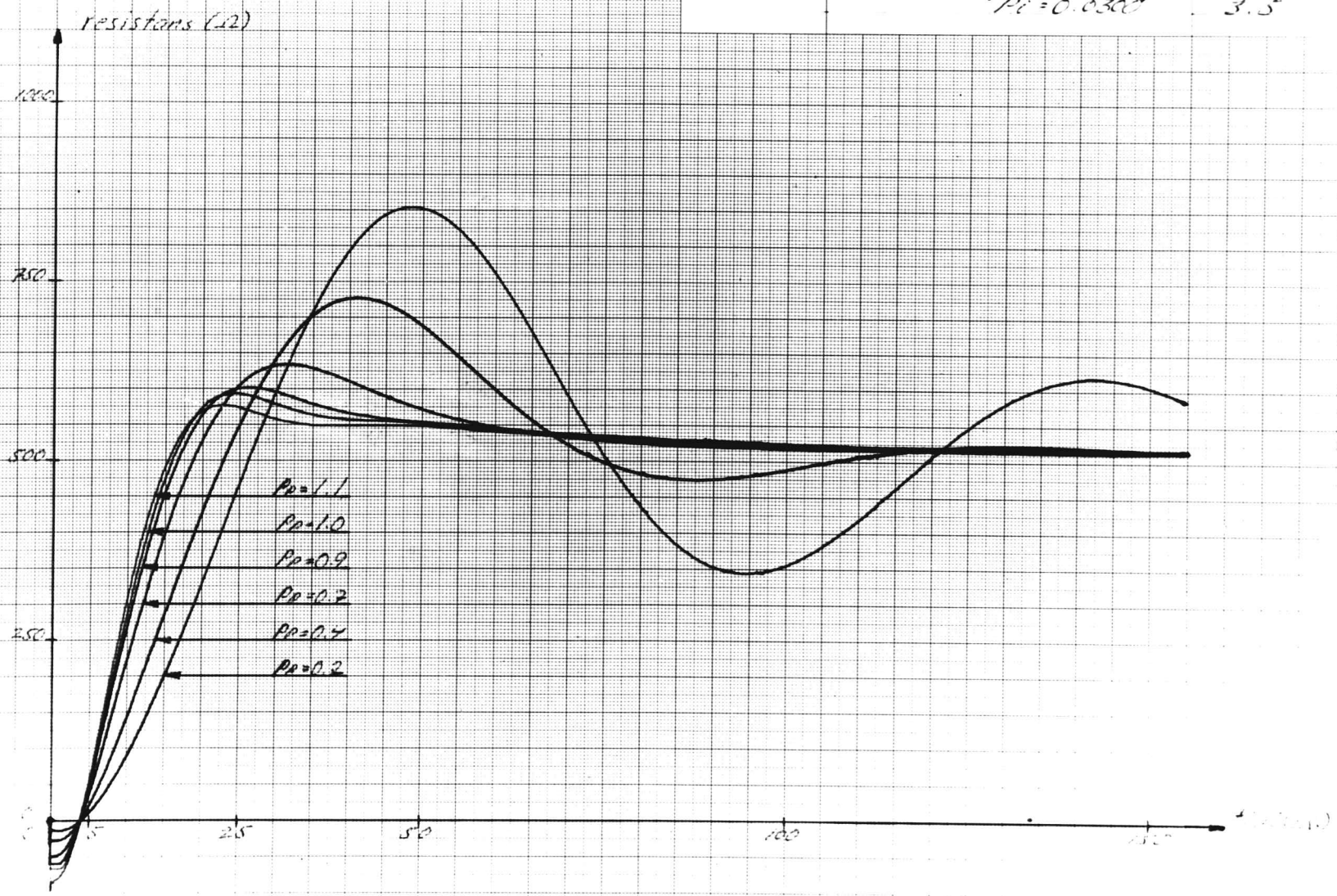
Inställning av PI-reg. Diagram 3.3  
 $P_i = 0.0100$



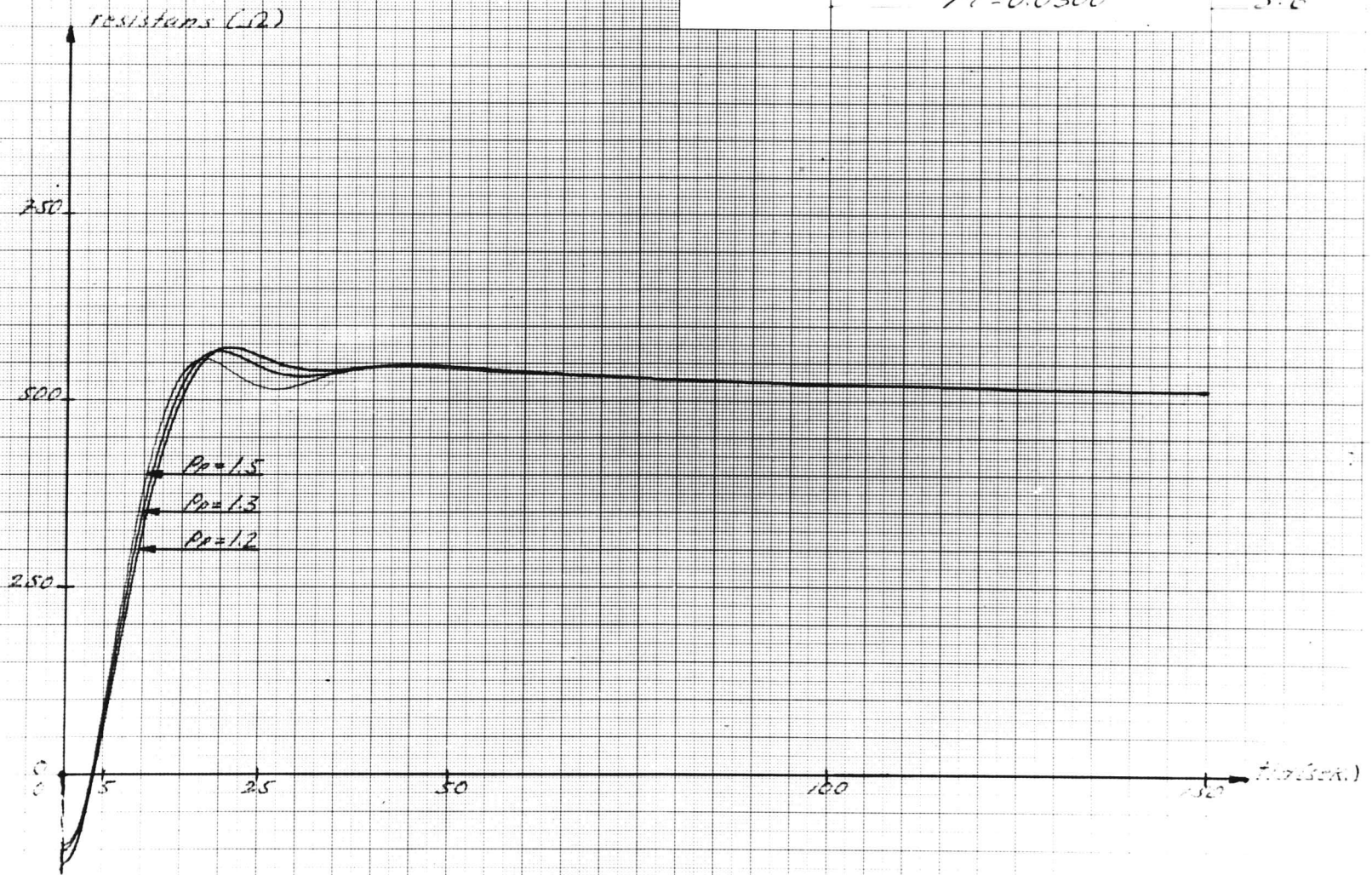
Inställning av PI-reg. Diagram 3.7  
 $PI = 0.0156$



Inställning av PI-reg. Diagram  
 $P_i = 0.0300$  3.5

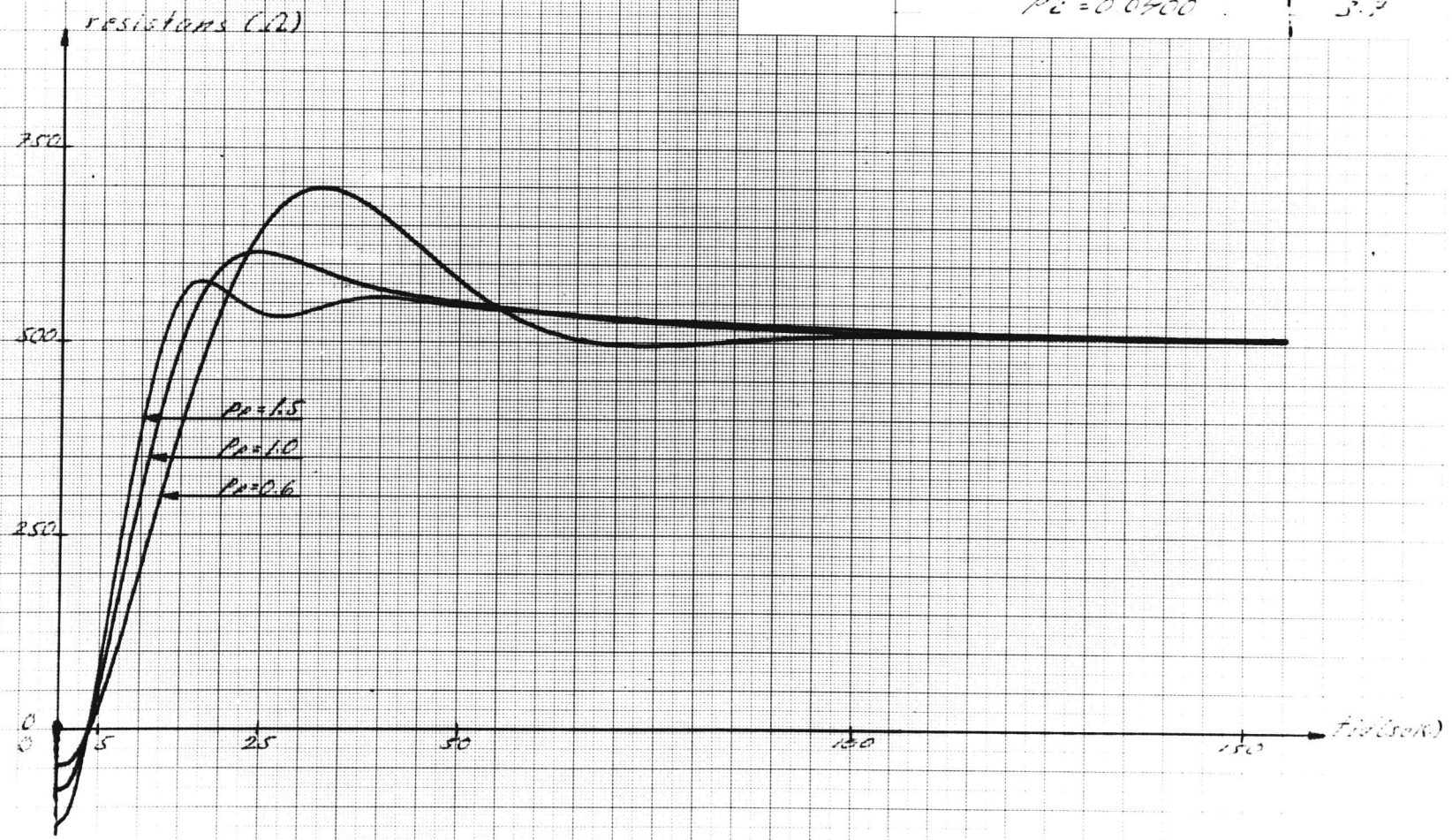


Inställning av PI-reg. Diagram 3.6  
 $P_i = 0.0300$

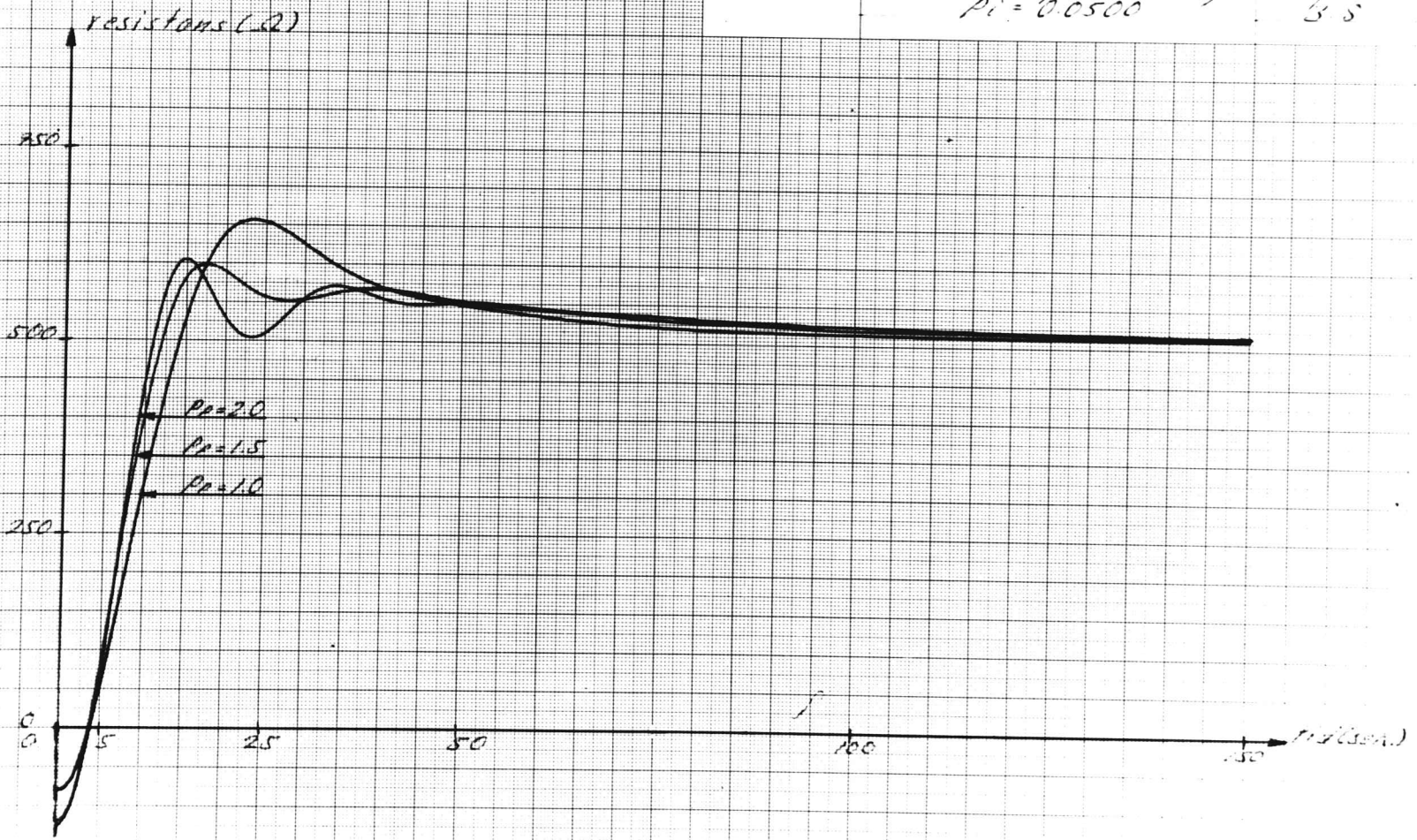


Inställning av PI-reg.  $P_i = 0.0400$

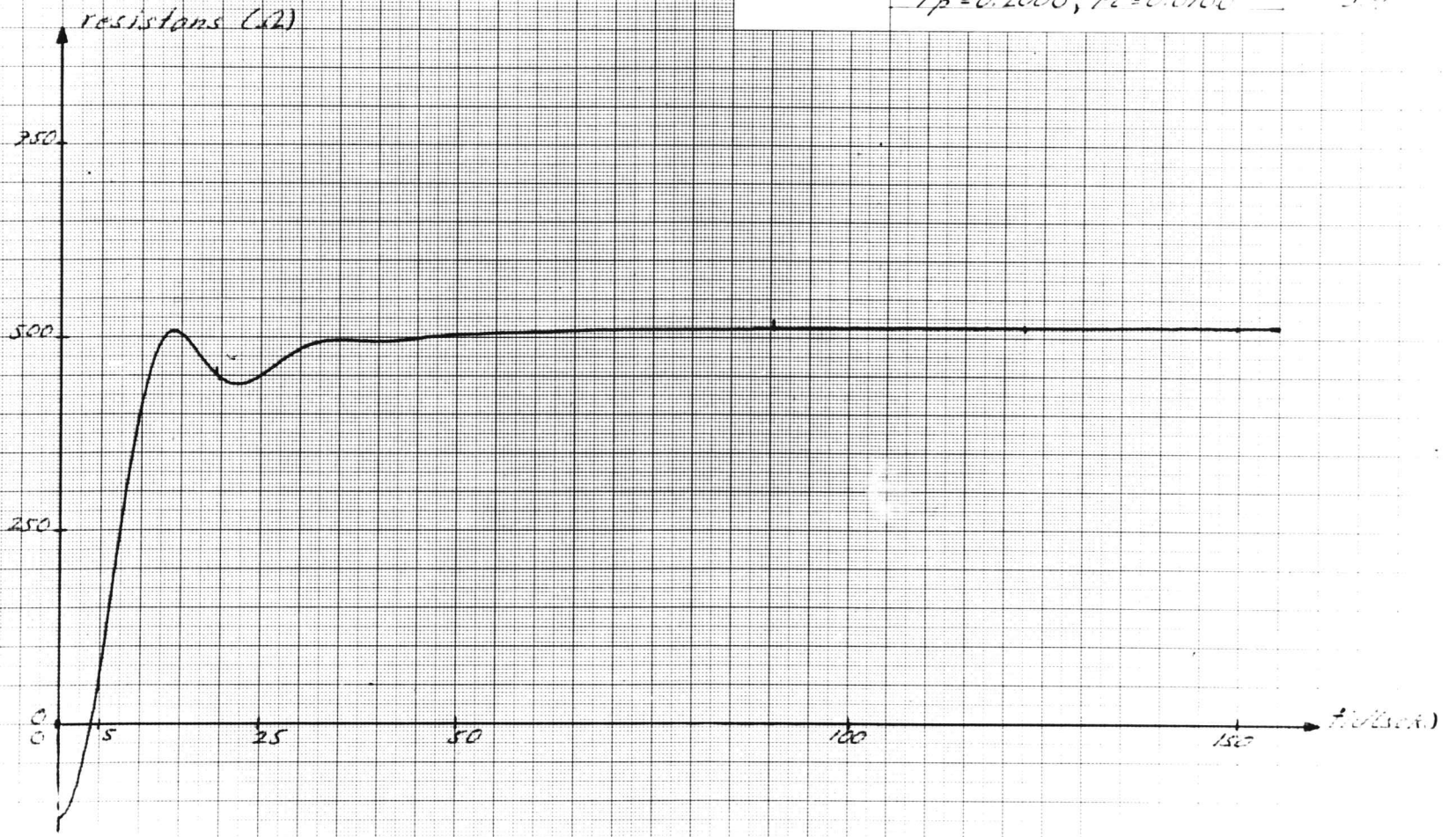
Diagram 5.7



Jns fällning av PI-reg. Diagram  
 $P_i = 0.0500$



"Basta" steget Diagram  
 $P_p = 0.2000, P_i = 0.0100$  15.3





arbets-temp.  $12^{\circ}\text{C}$   
temp. steg 0

Diagram  
4.1

Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )

7.5

5.0

2.5

x

x

x

3 1/4

4 1/2

4 1/4

startångd

arbets-temp.  $15^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $0$

Diagram  
4.2

temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )

7.5

5

2.5

1 stavelängd

1/4

1/2

3/4

x

x

x

arbets temp. 20°C  
temp. steg 0

Diagram  
4.3

temp. (°C)

7.5

5.0

2.5

1/4

1/2

3/4

1 efter längd

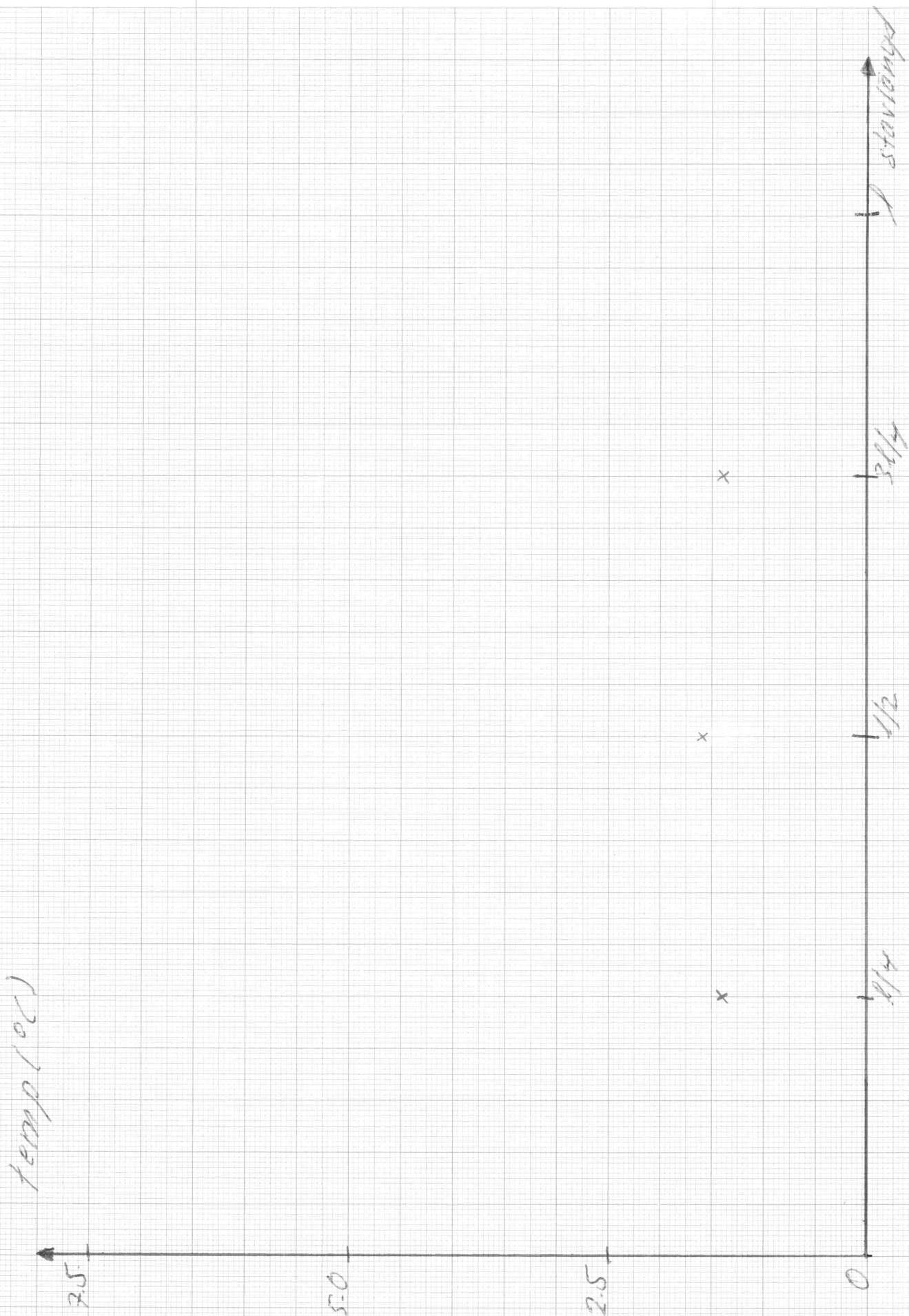
x

x

x

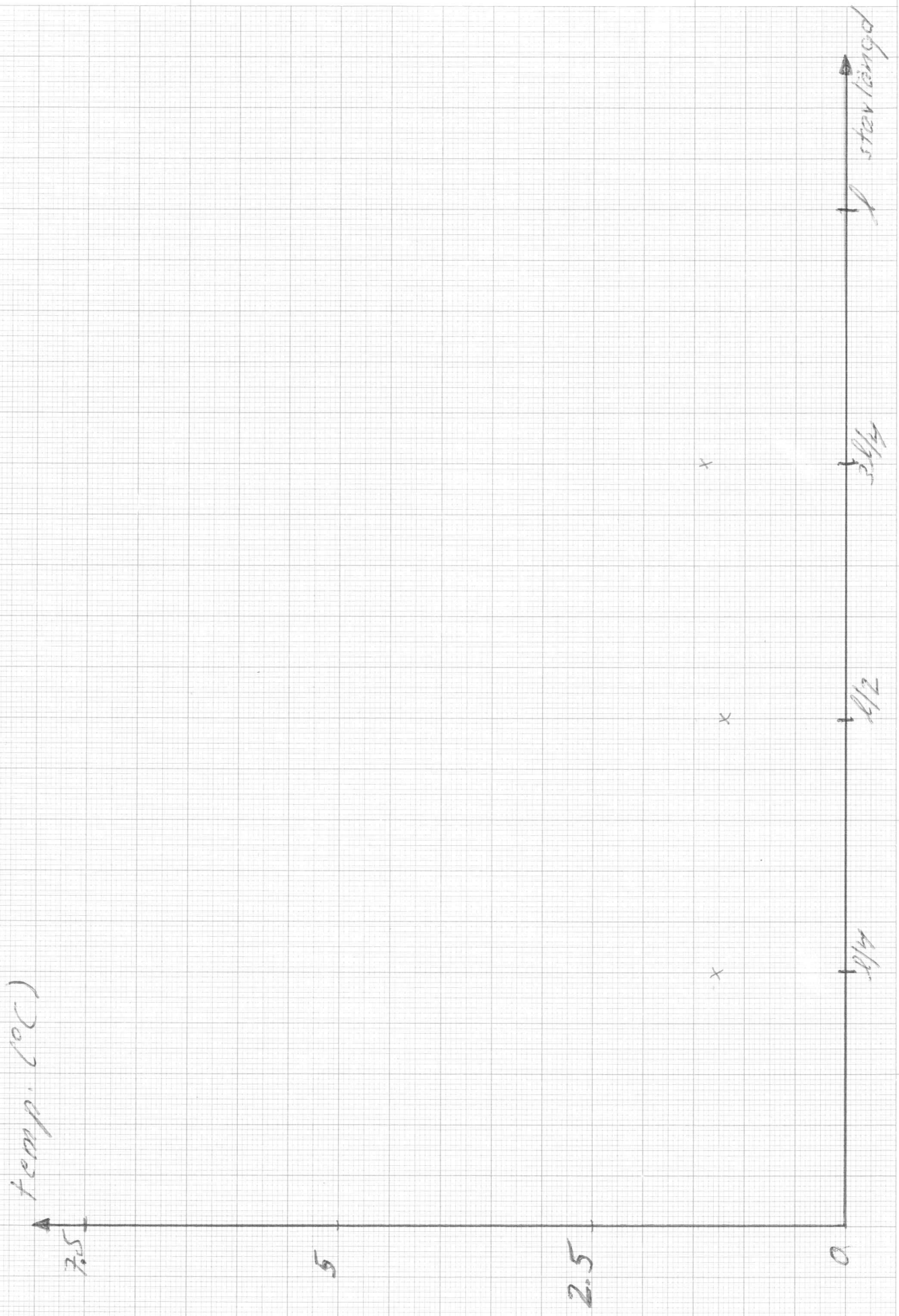
arbetstemp.  $23^{\circ}\text{C}$   
temp. steg 0

Diagram  
4.4



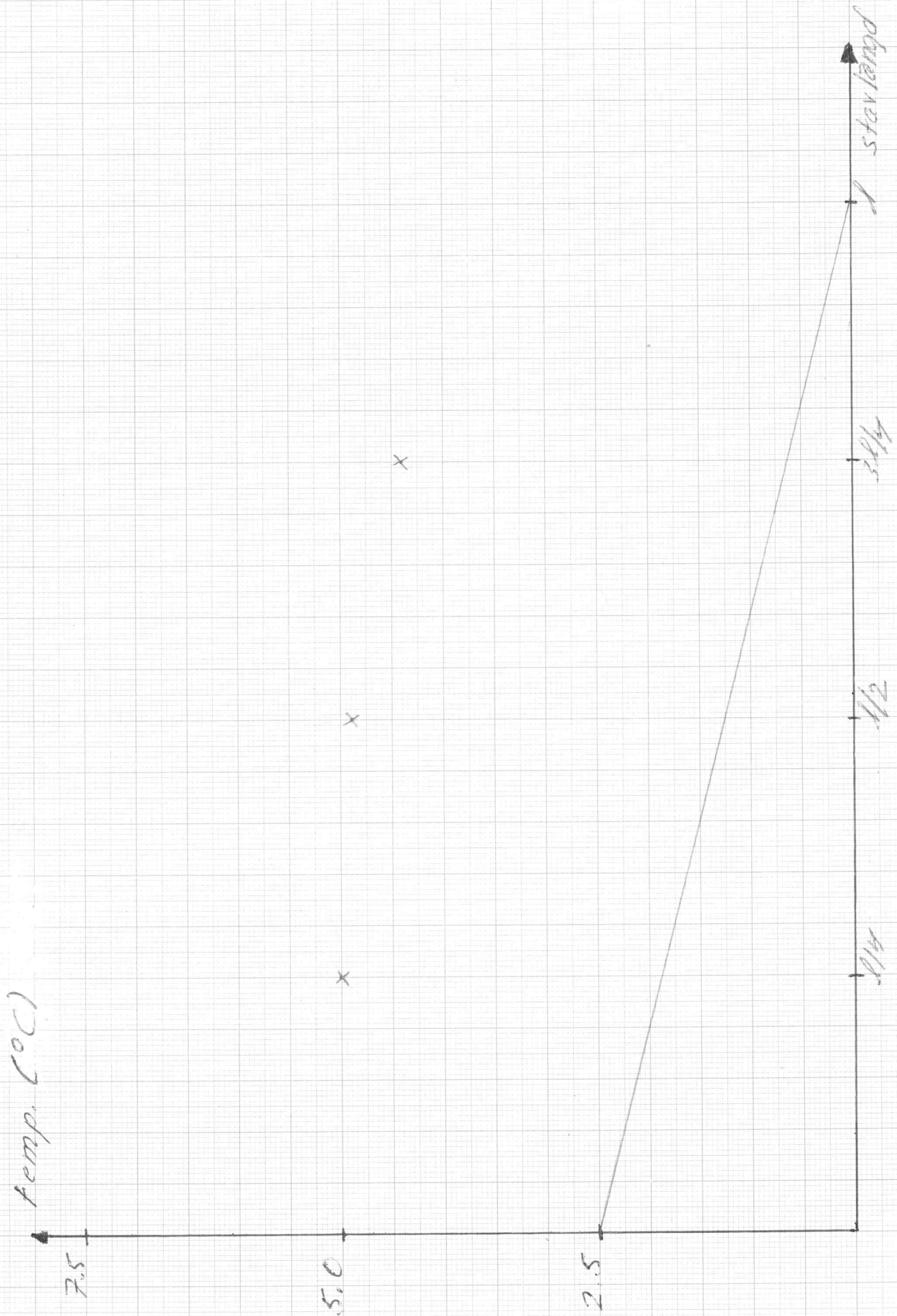
arbets temp.  $24^{\circ}\text{C}$   
temp. steg 0

Diagram  
4.5



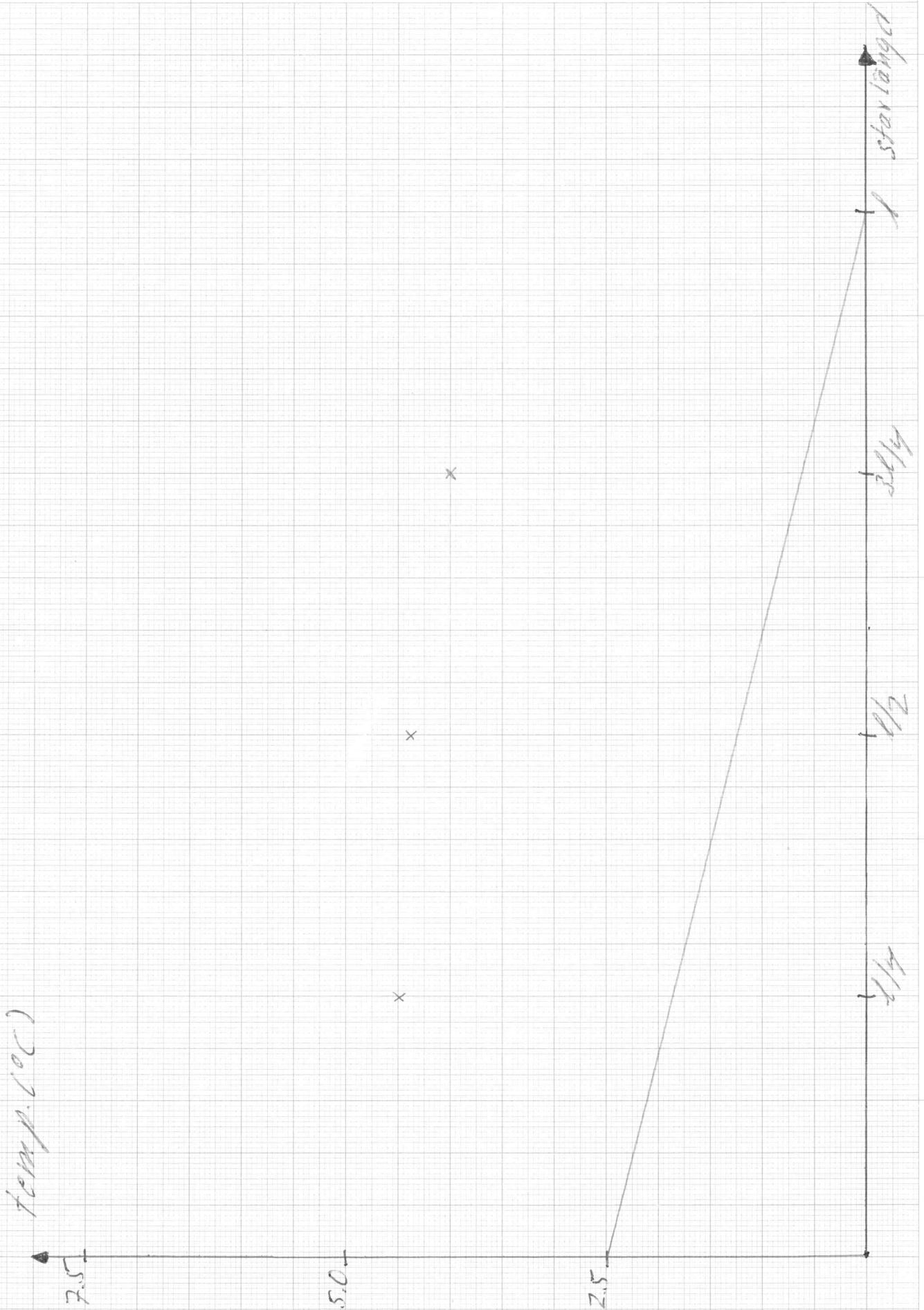
Arbets temp.  $12^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $2.5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.6



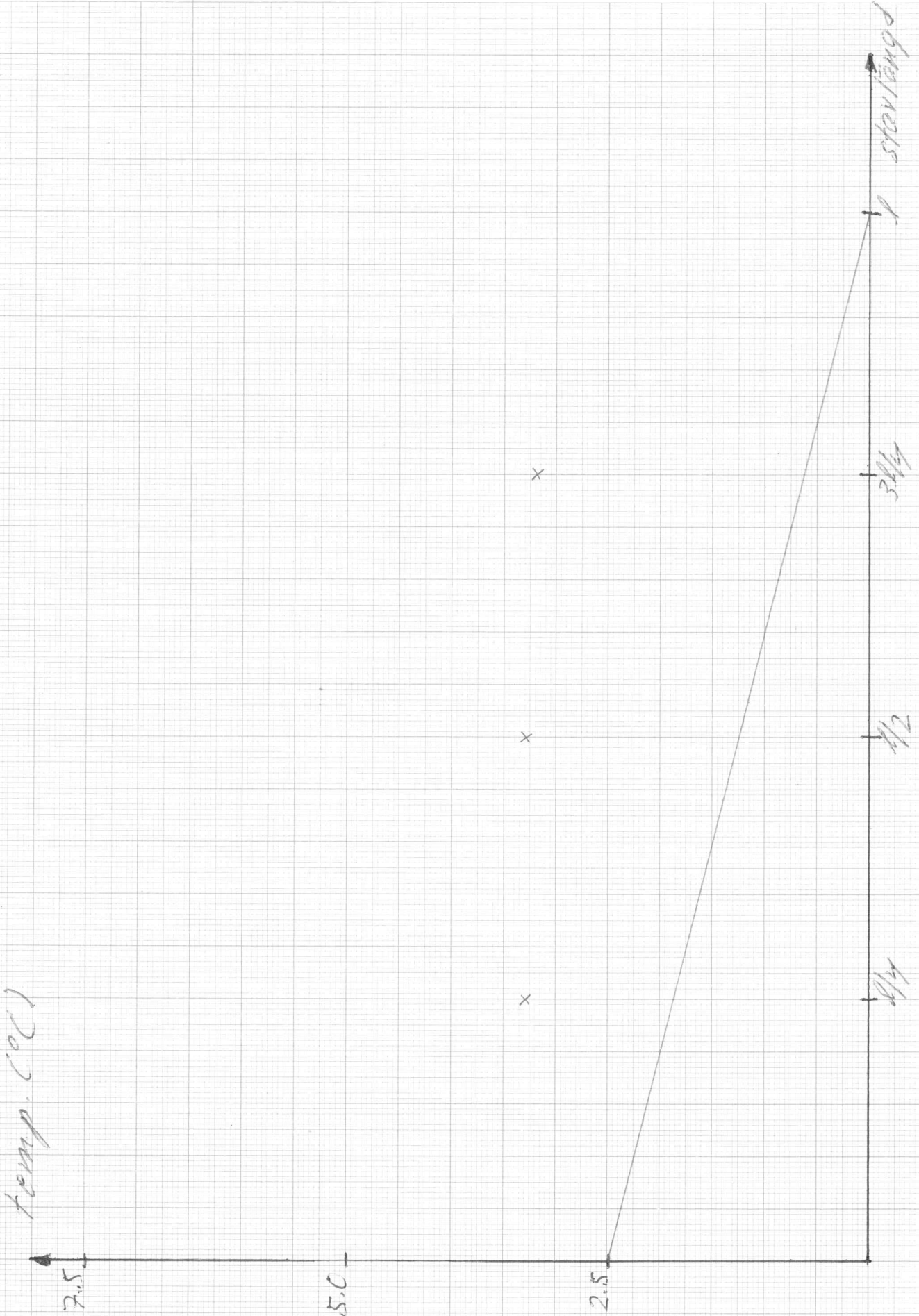
arbets temp. 15°C  
temp. steg 2.5°C

Diagram  
4.7



arbets temp.  $20^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $2.5^{\circ}\text{C}$

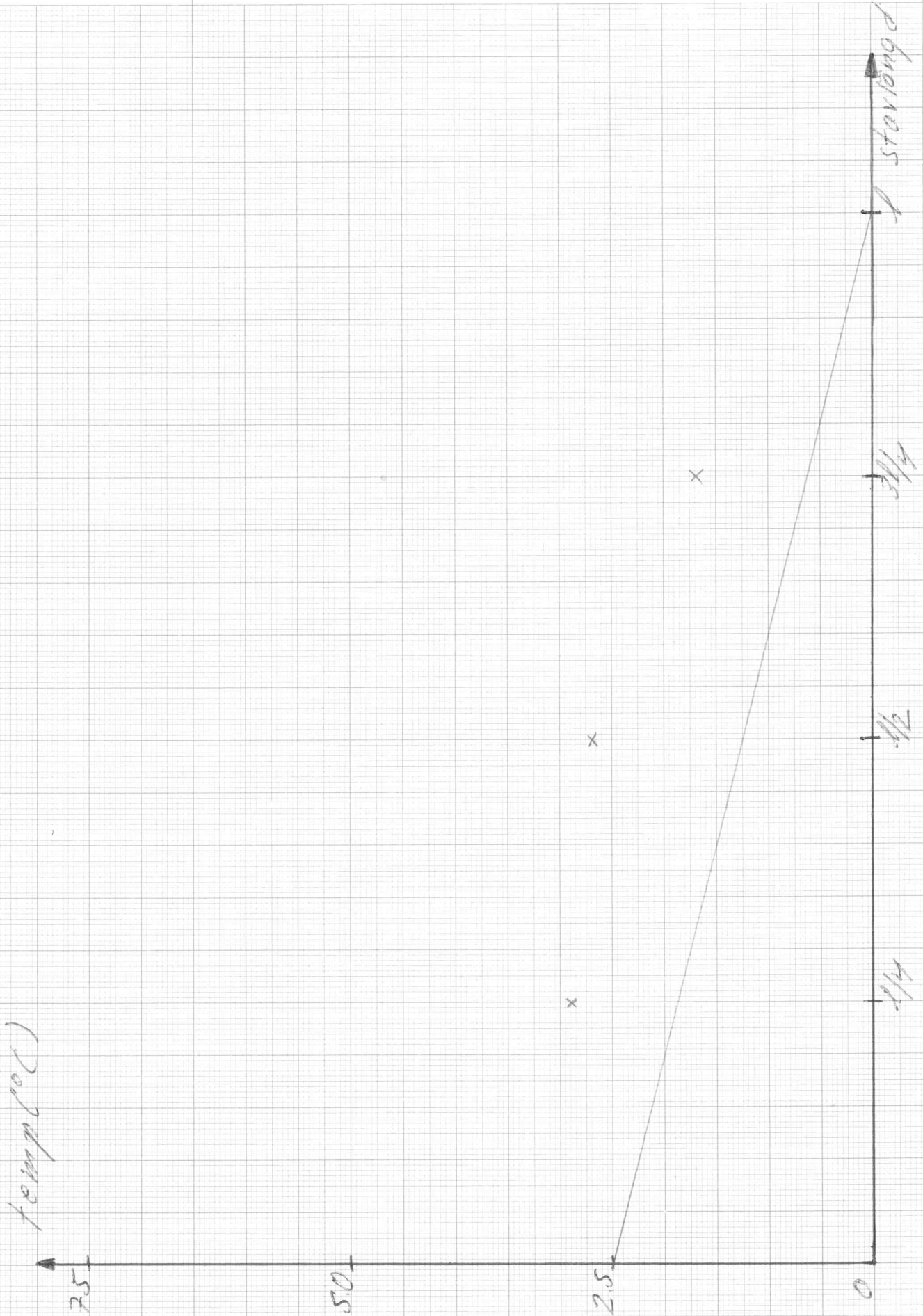
Diagram  
4.8





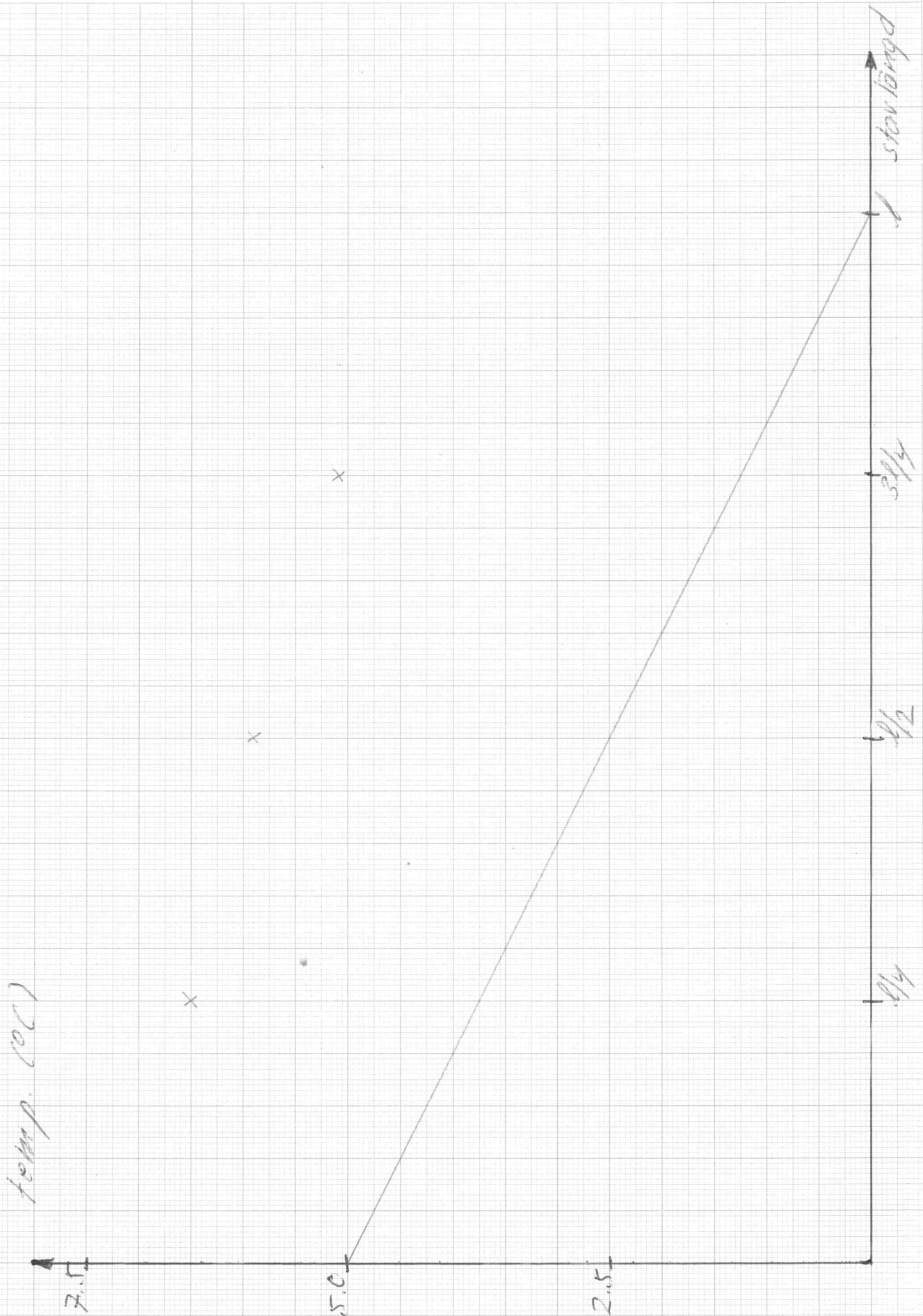
arbets temp.  $23^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $2.5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.9



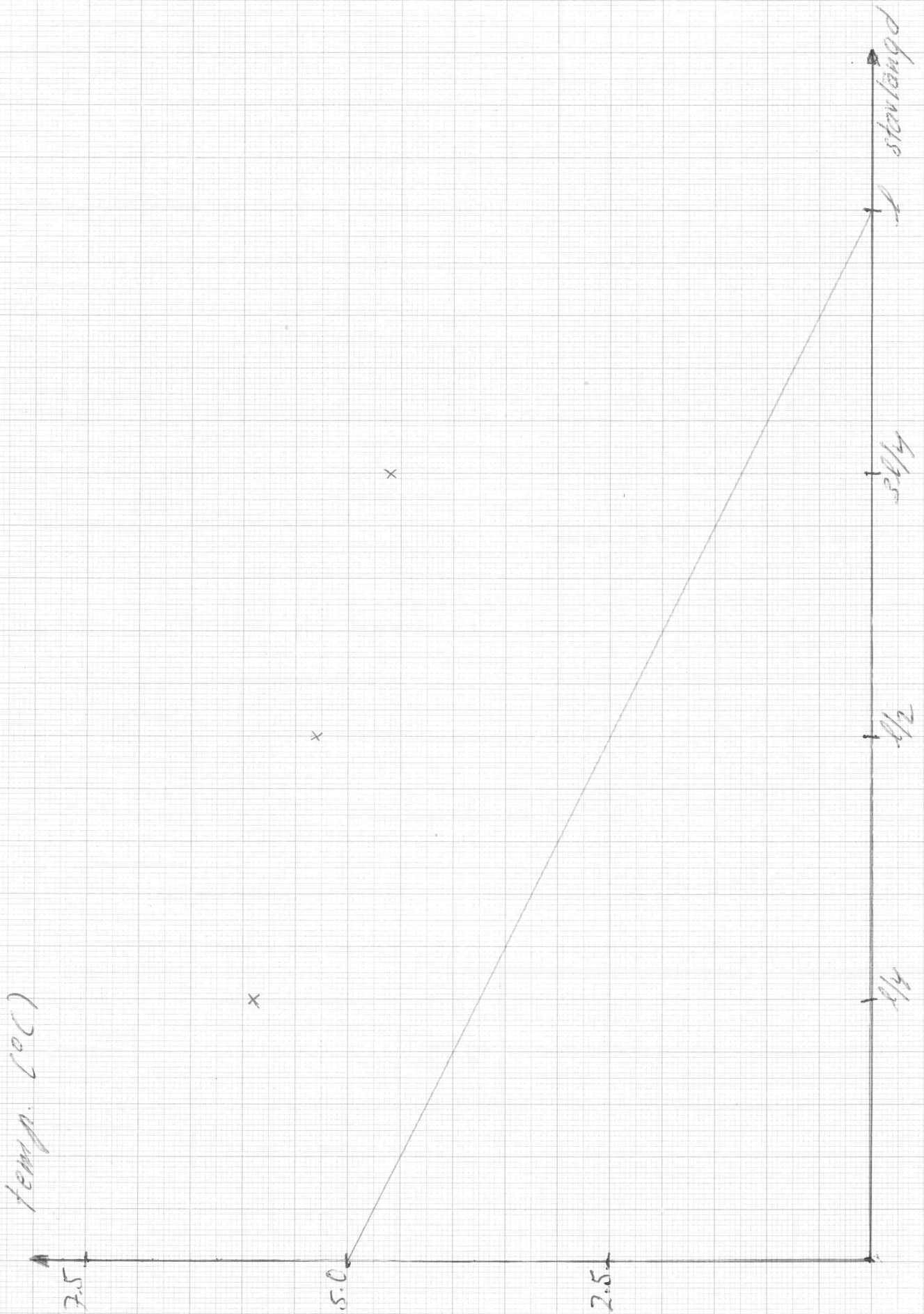
arbets-temp.  $12^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.10



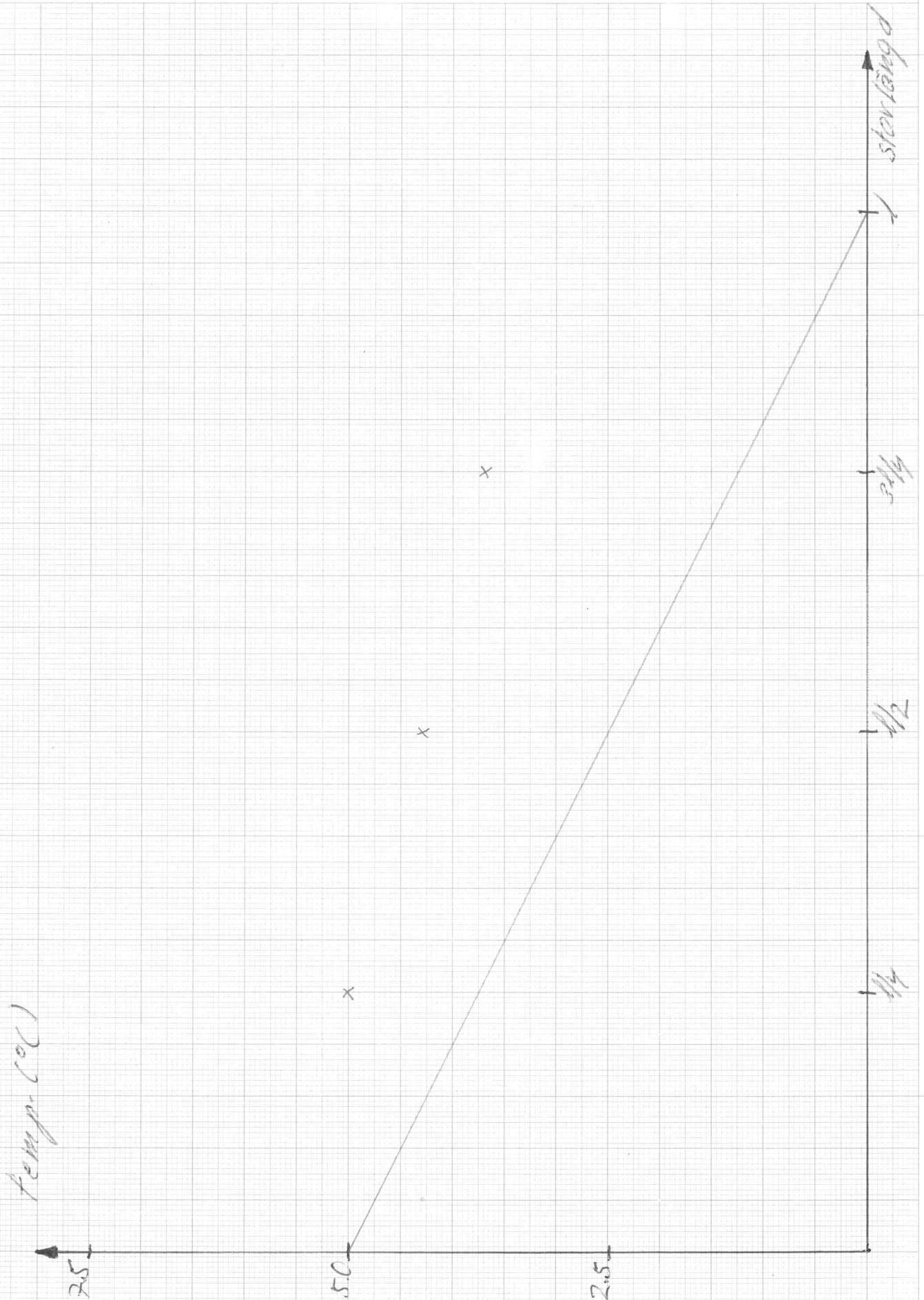
arbets-temp  $15^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.11



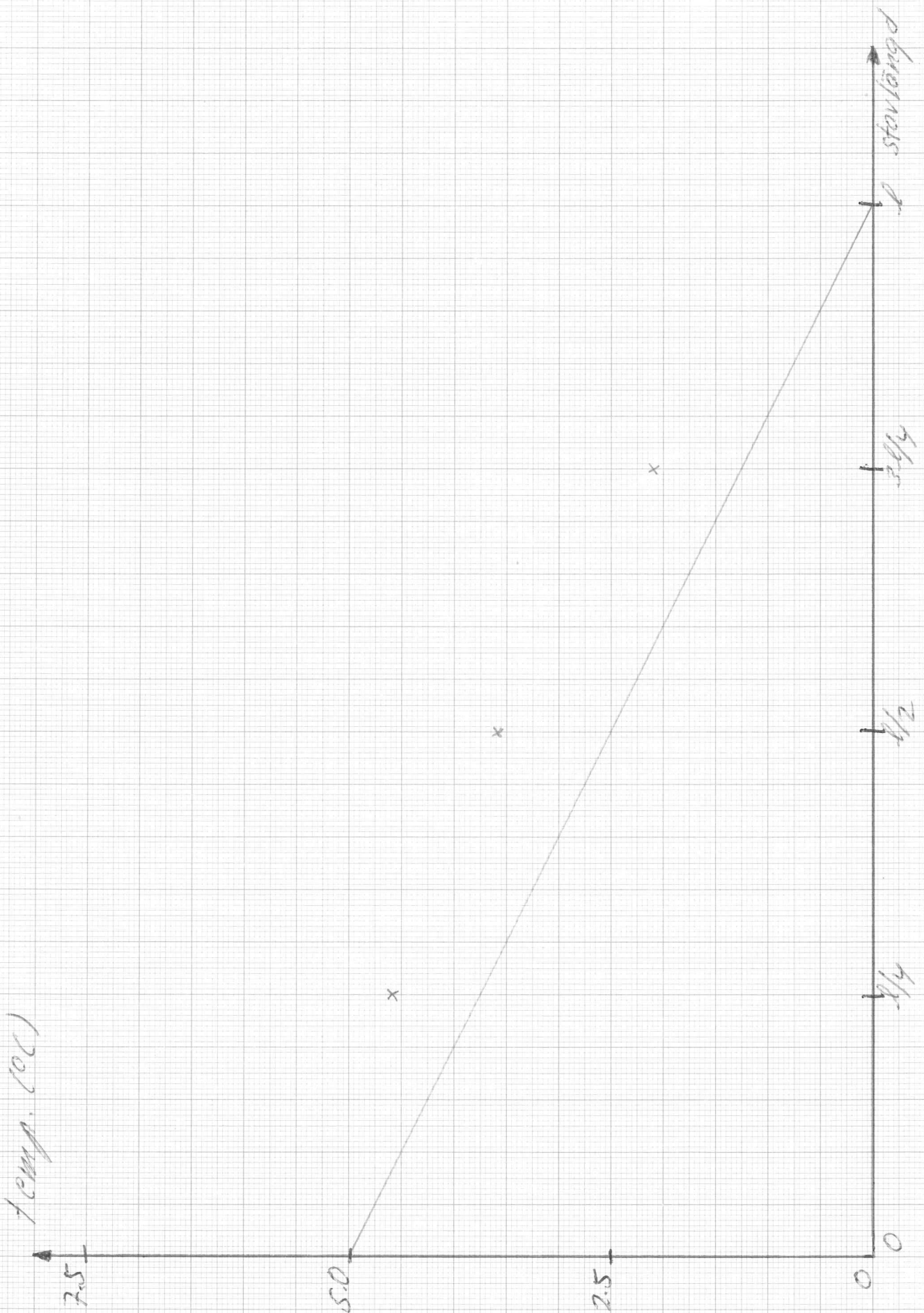
arbets-temp.  $20^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.12



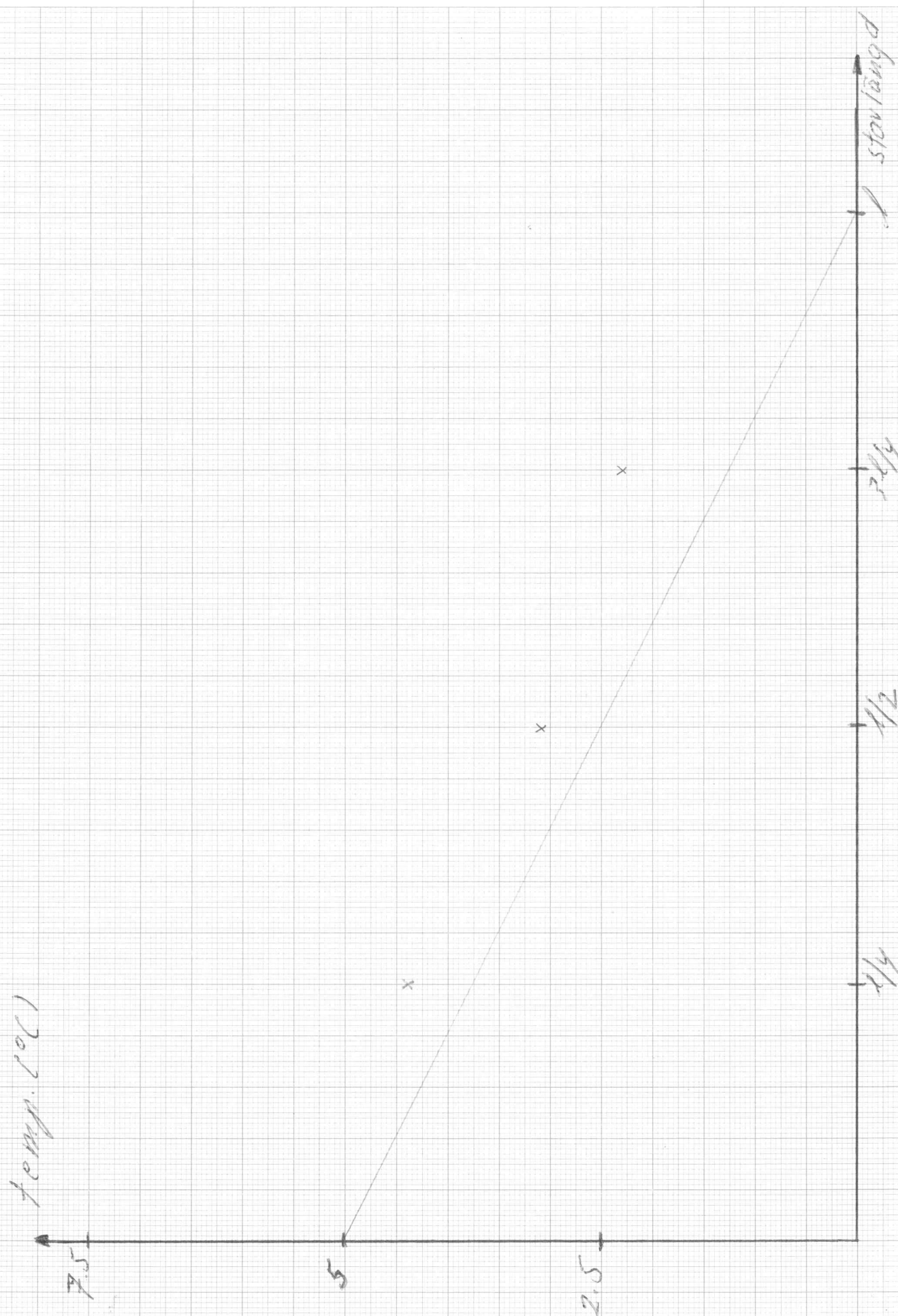
arbets-temp.  $23^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.13



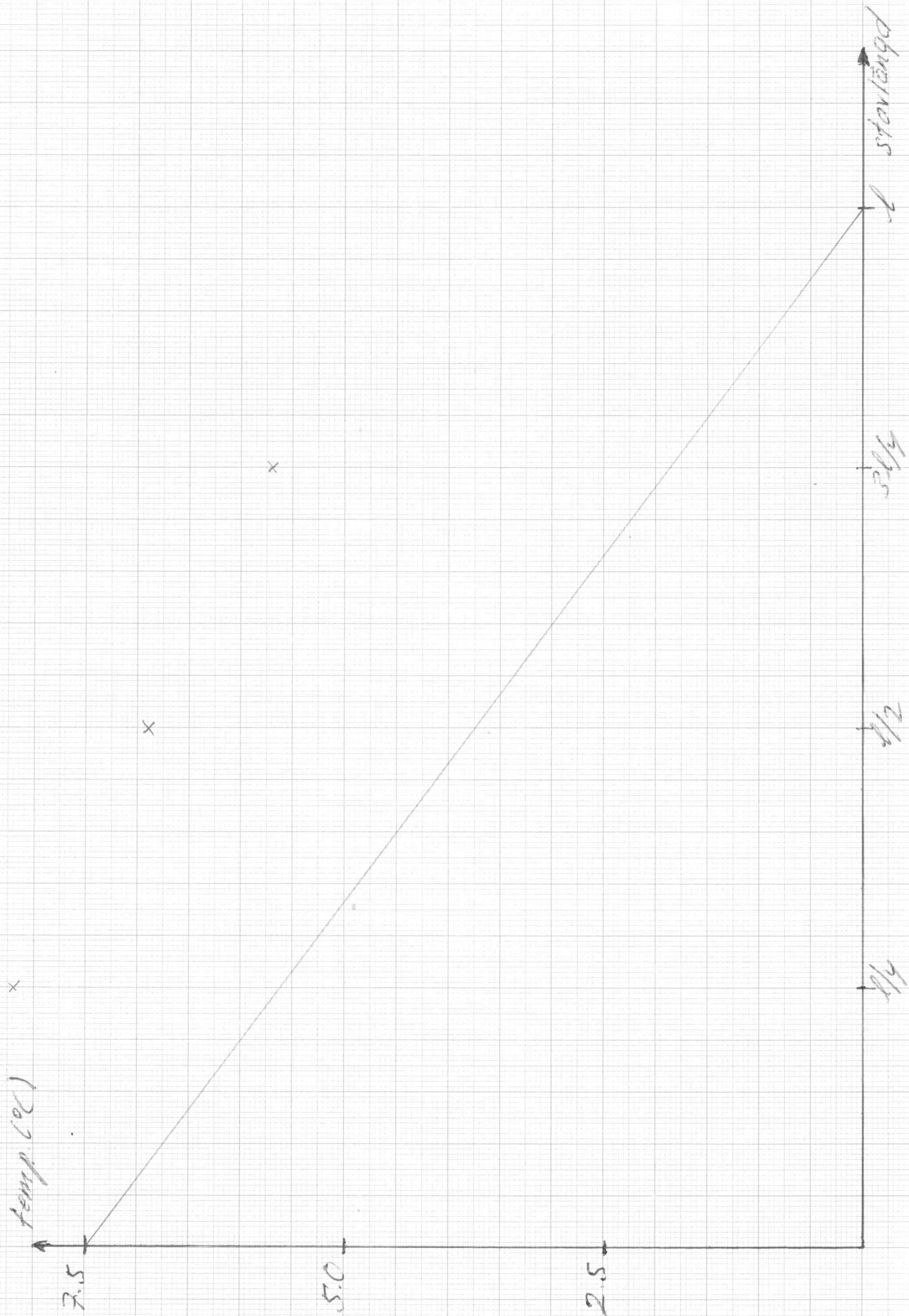
arbetstemp.  $24^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.14



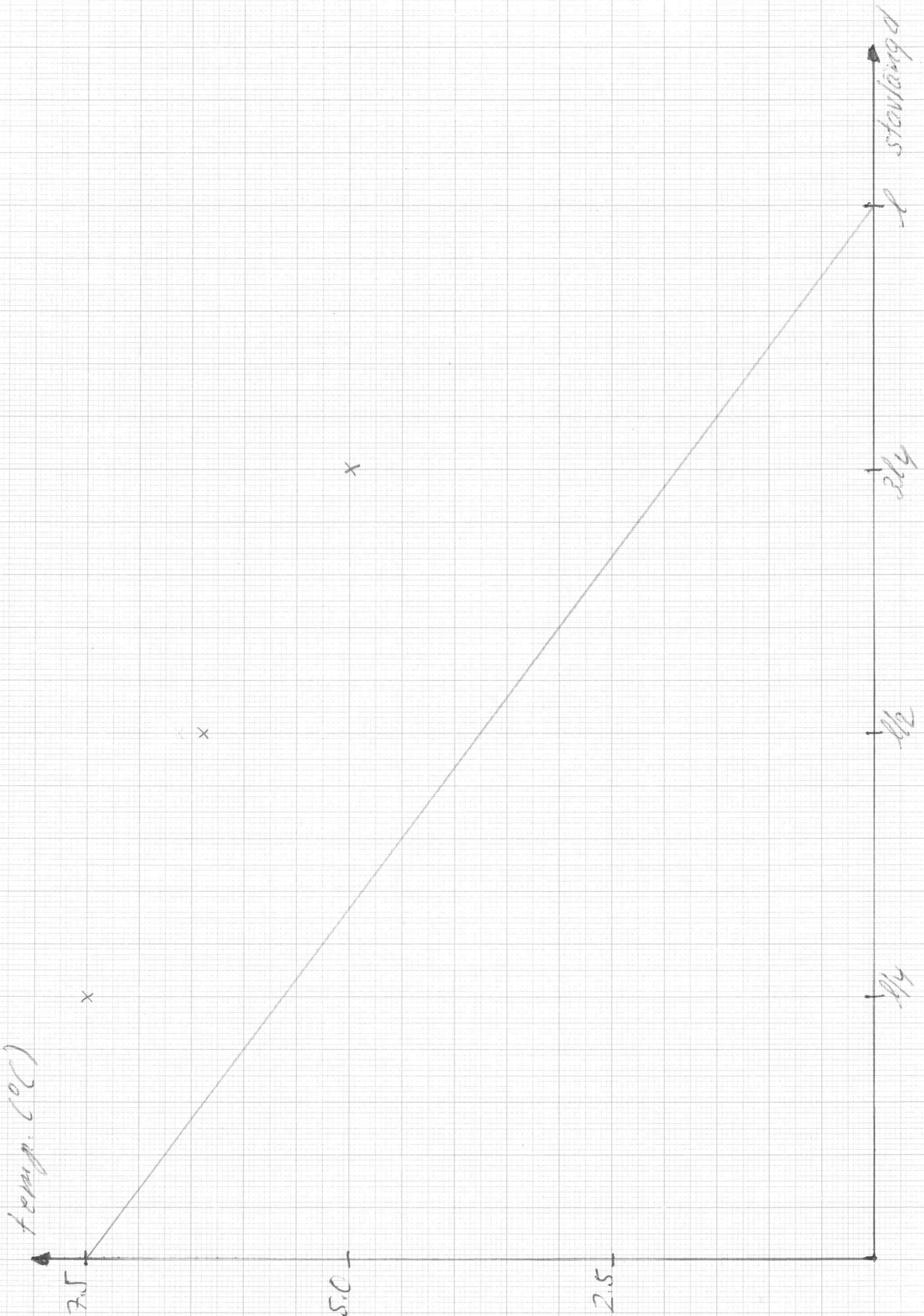
arbetstemp.  $12^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $7.5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.15



arbetstemp.  $15^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $7.5^{\circ}\text{C}$

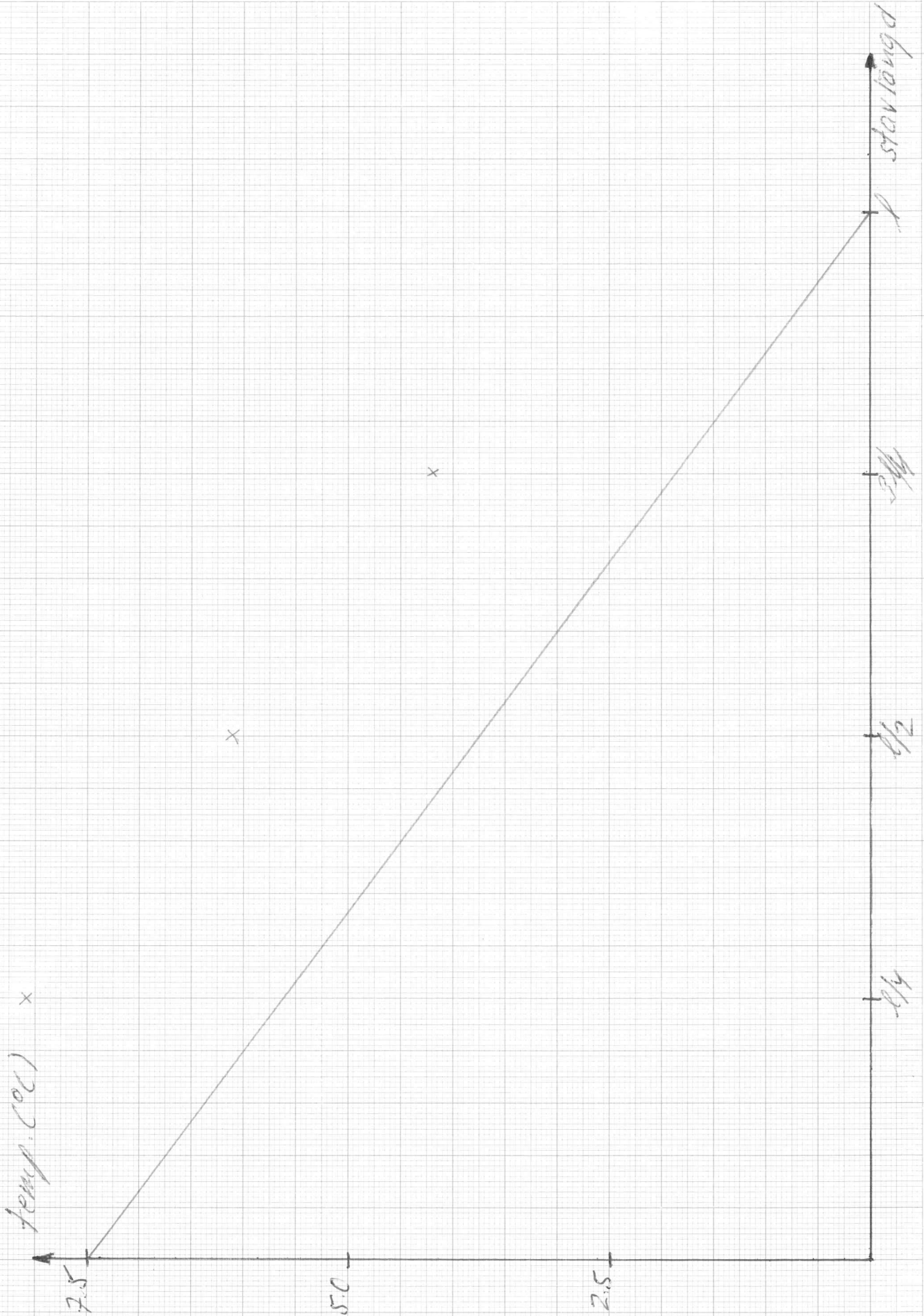
Diagram  
4.16





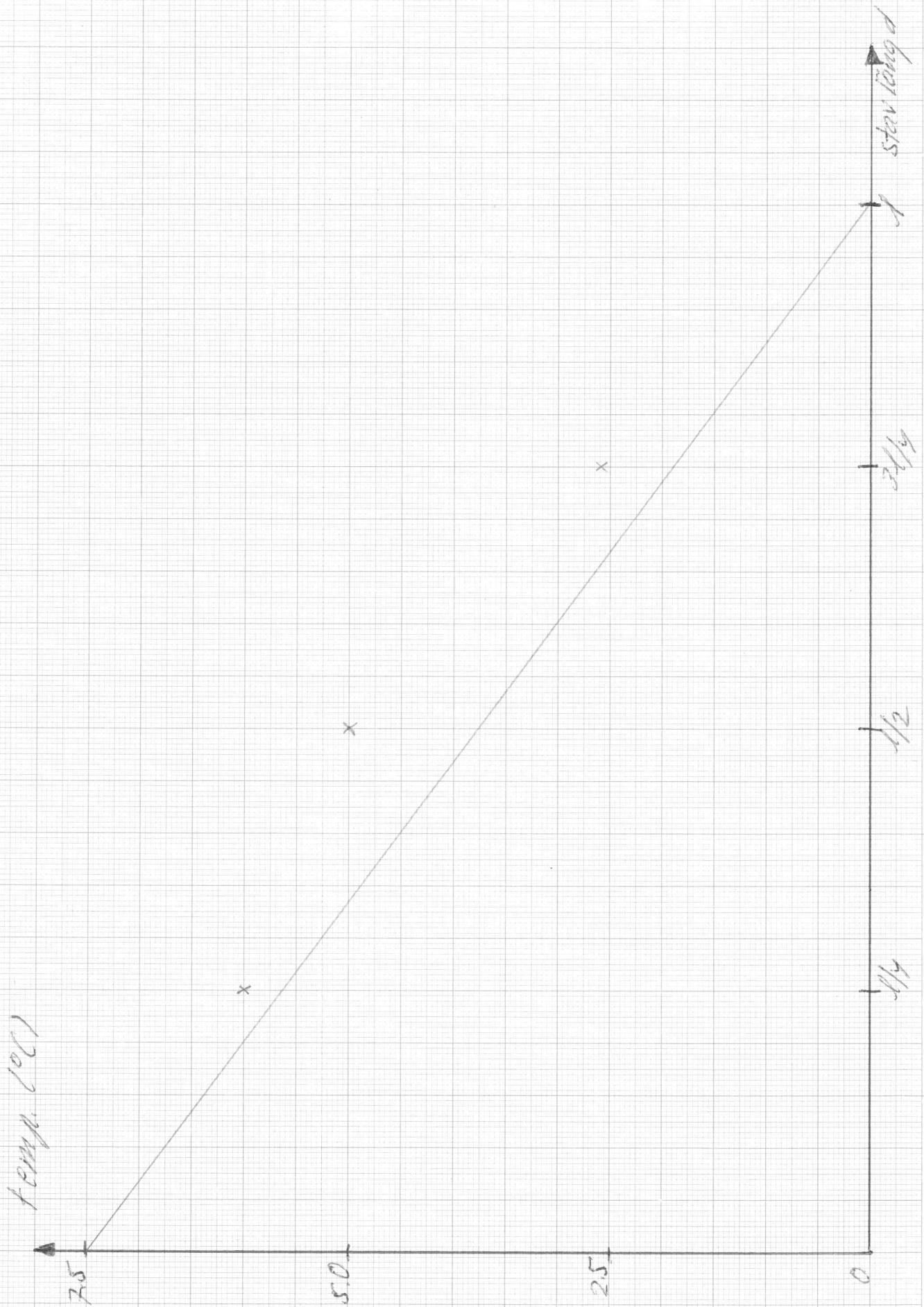
arbetstemp. 20°C  
temp.steg 7.5°C

Diagram  
4.17

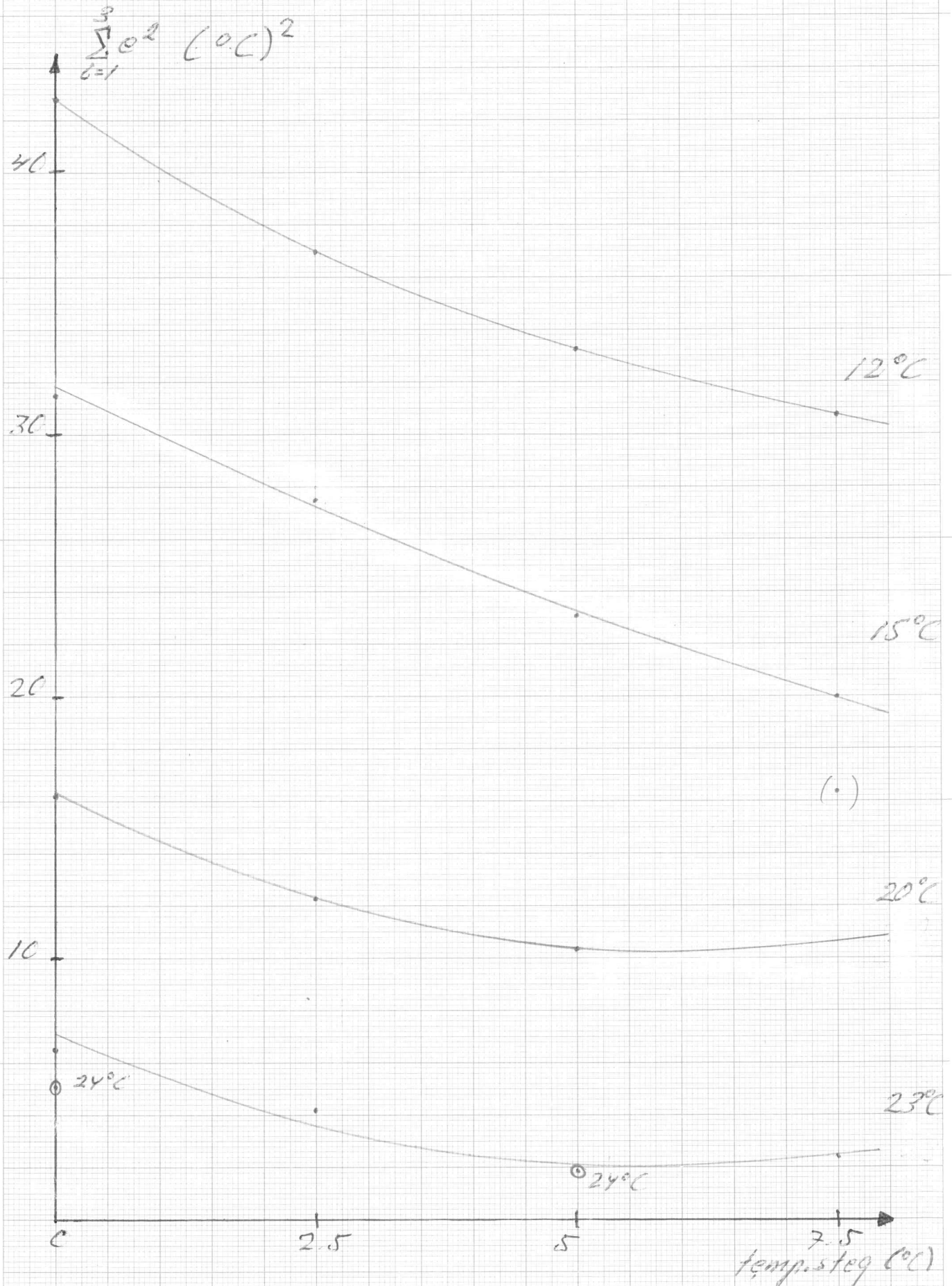


arbets temp.  $23^{\circ}\text{C}$   
temp. steg  $7.5^{\circ}\text{C}$

Diagram  
4.18

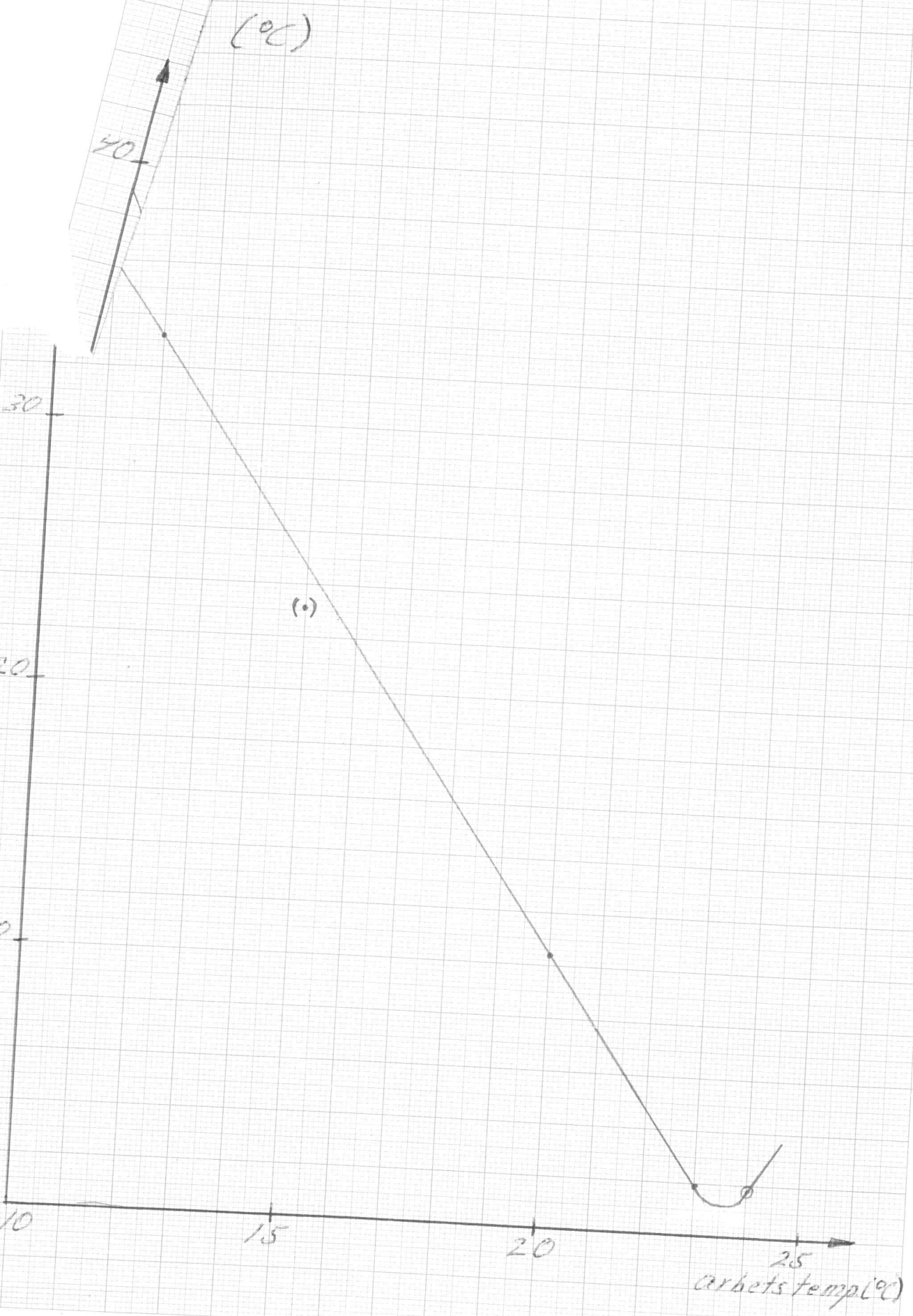


$\sum_{i=1}^3 e^2$  som funktion av olika temp. steg Diagram 4.19

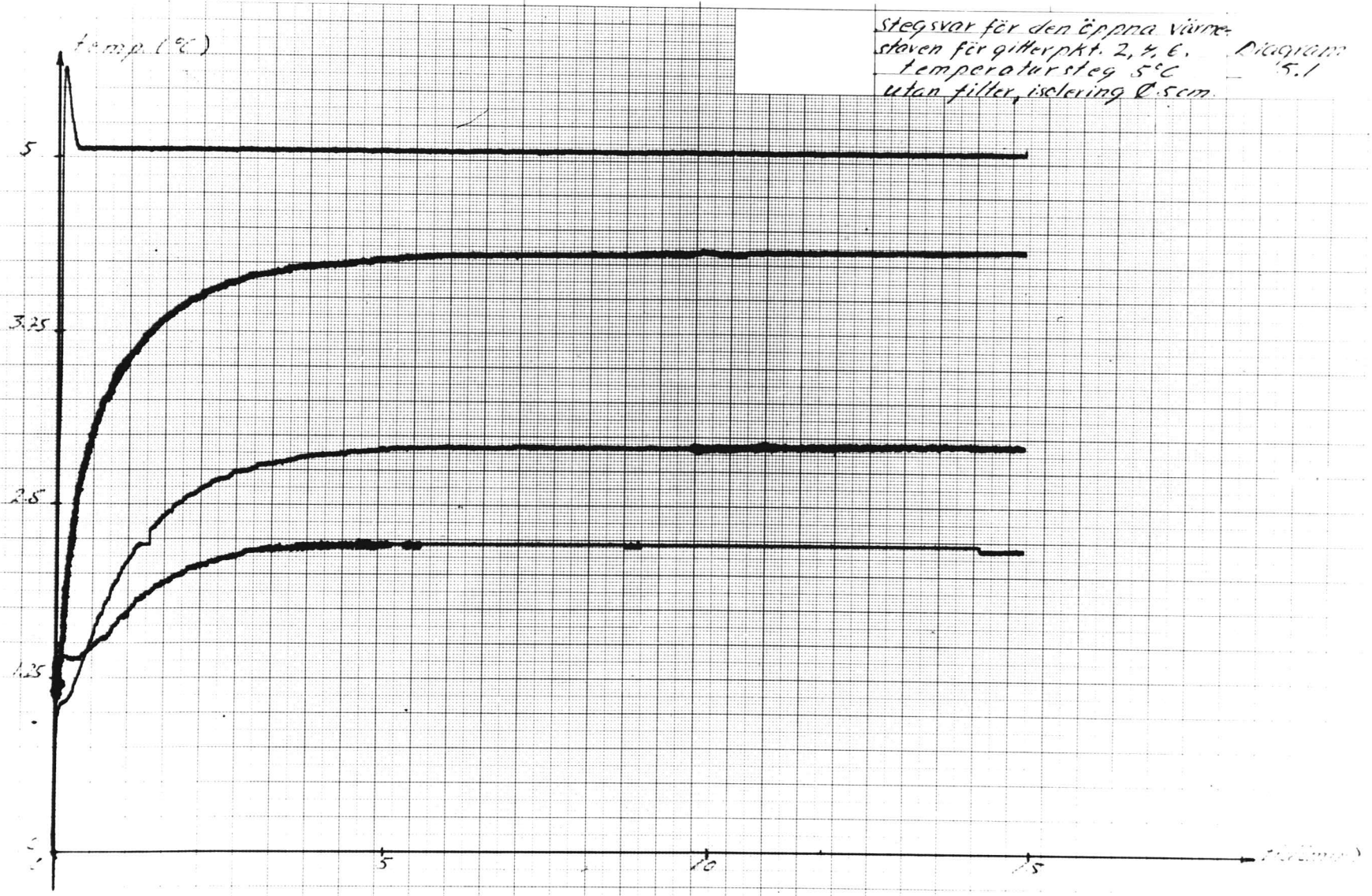


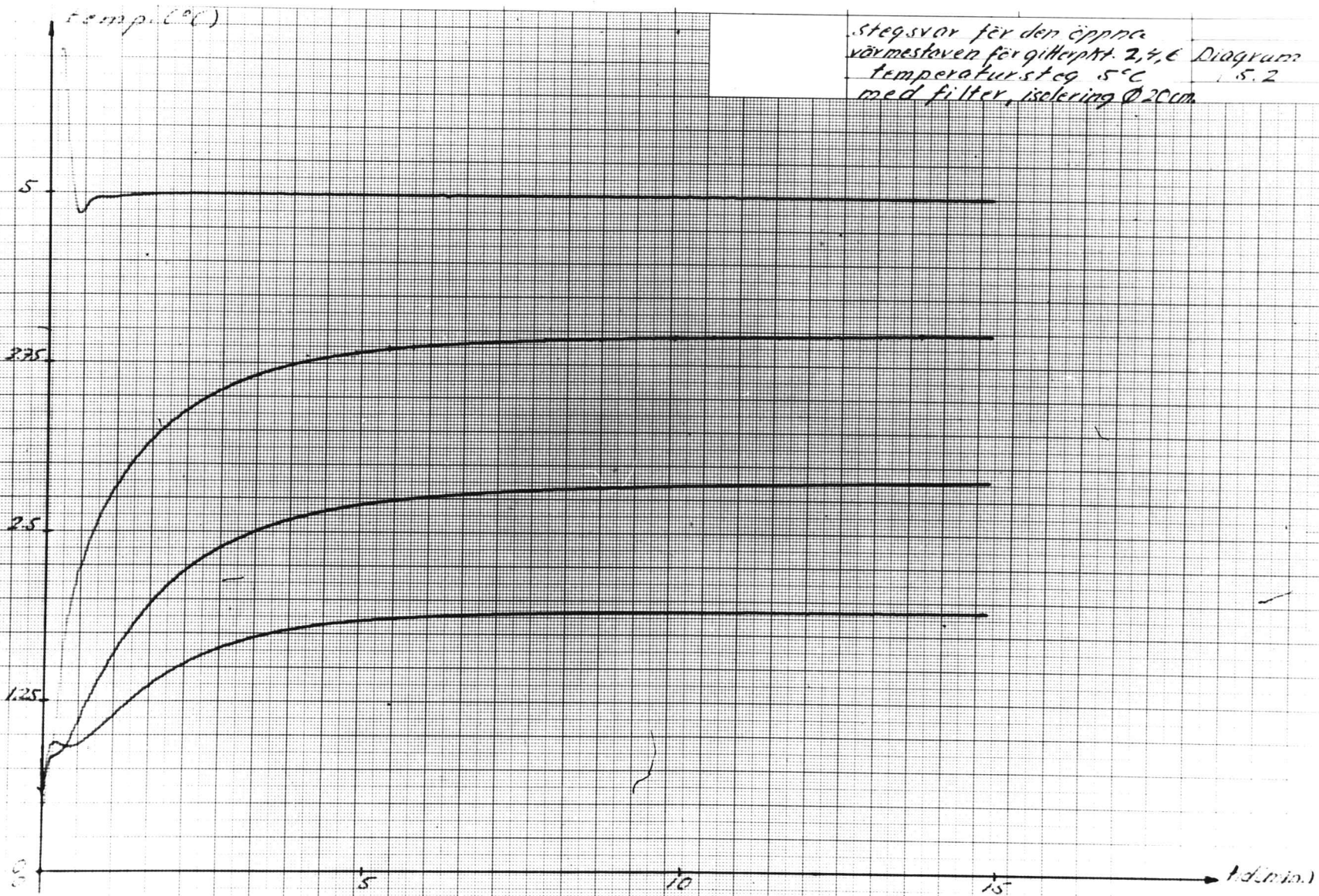
M<sub>rel</sub> som funktion av  
arbetstemperaturen  
temp. steg 5°C

Diagram  
4.20

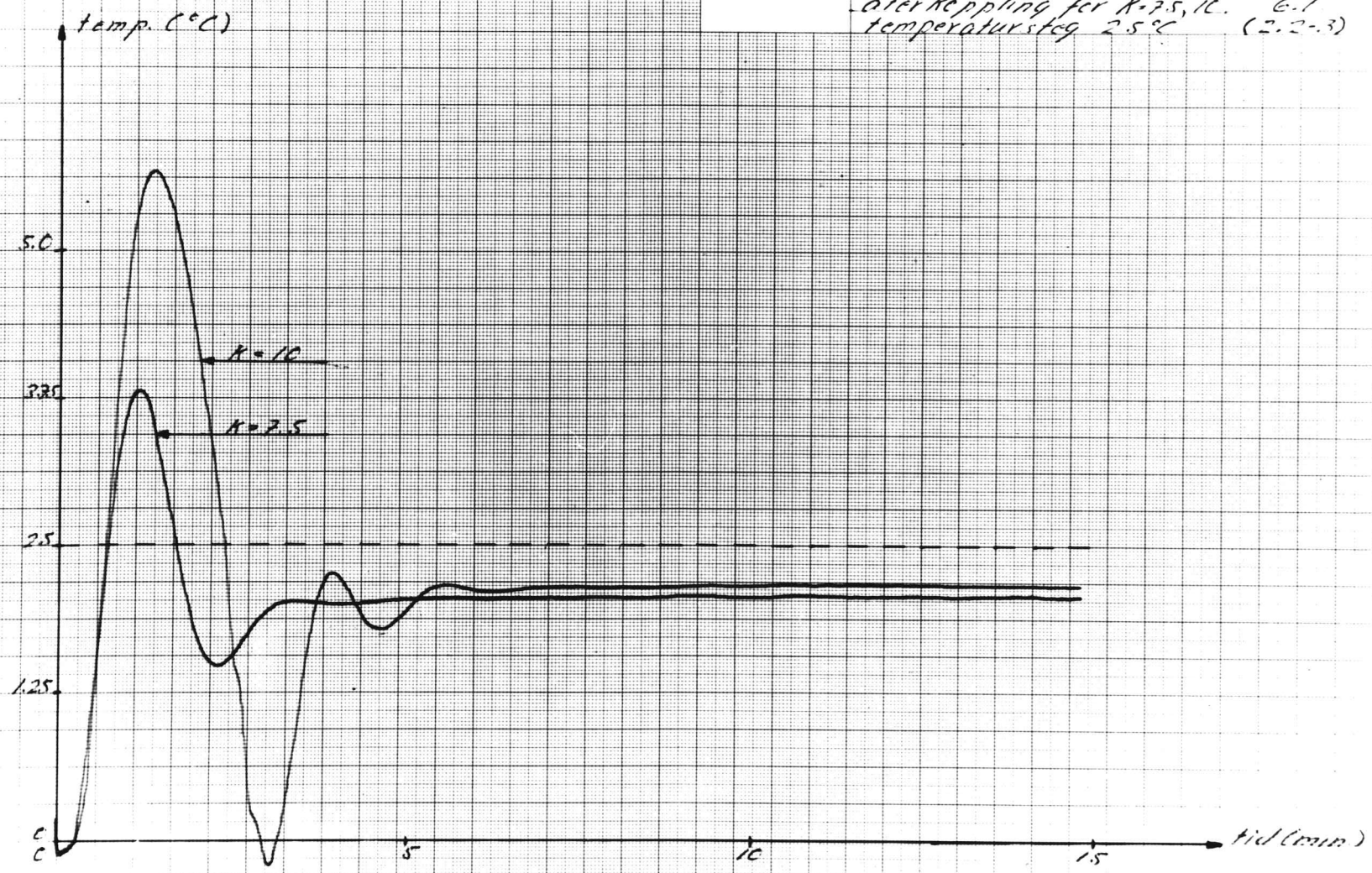


stegsvar för den öppna värme-  
staven för gitterpkt. 2, 4, 6. Diagram  
temperatursteg 5°C - 15.1  
utan filter, isolering 0.5cm.

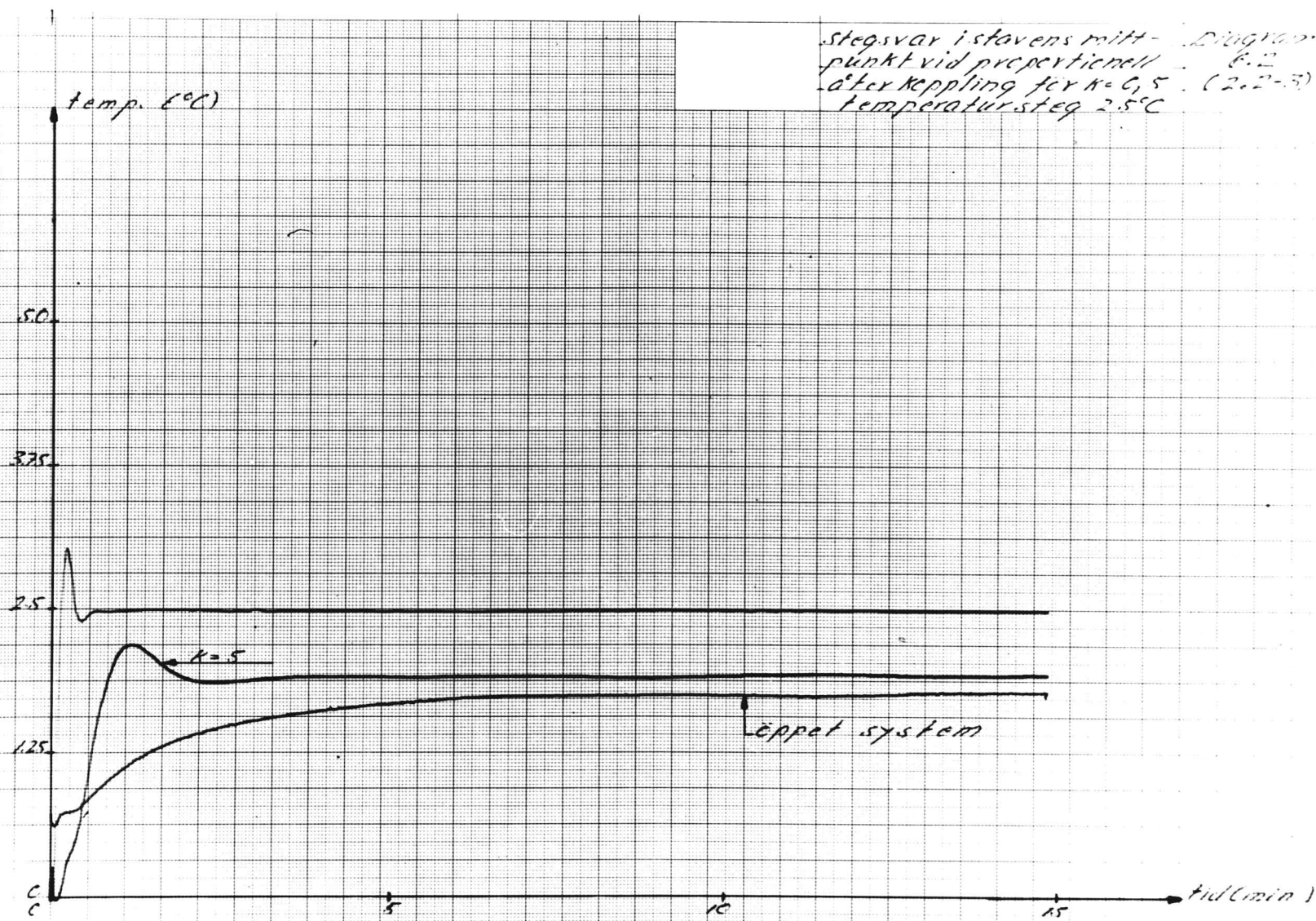




stegsvor i stovens mitt-  
punkt vid proportionell Diagram  
öler koppling för  $K=2.5, 10$ . E.1  
temperatursteg  $2.5^{\circ}\text{C}$  (2.2-3)

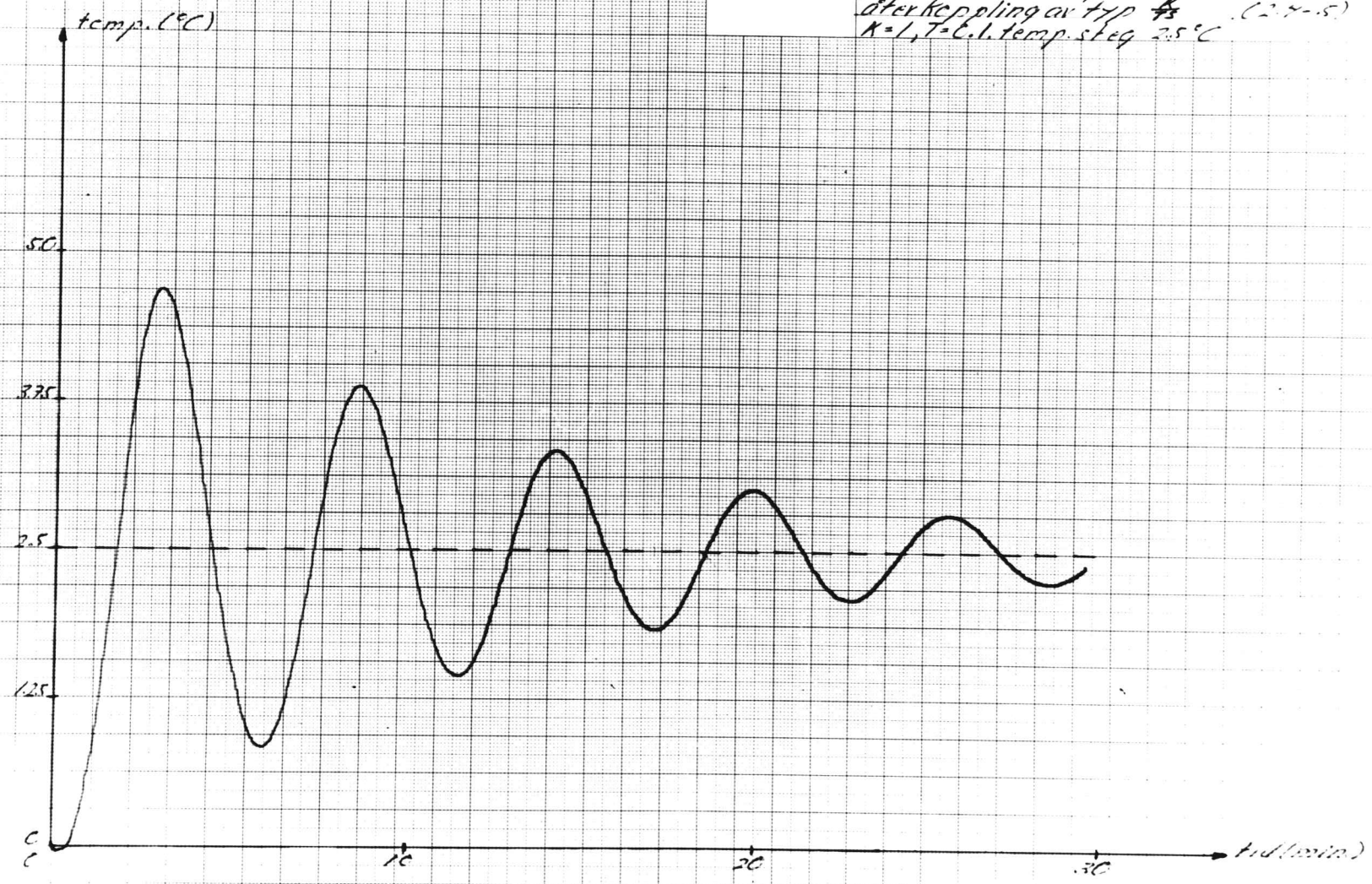


stegsvar i stavens mitt- Diagonal  
punkt vid proportionell 6.2  
återkoppling för  $K=6,5$  (2.2-5)  
temperatursteg  $2,5^{\circ}\text{C}$

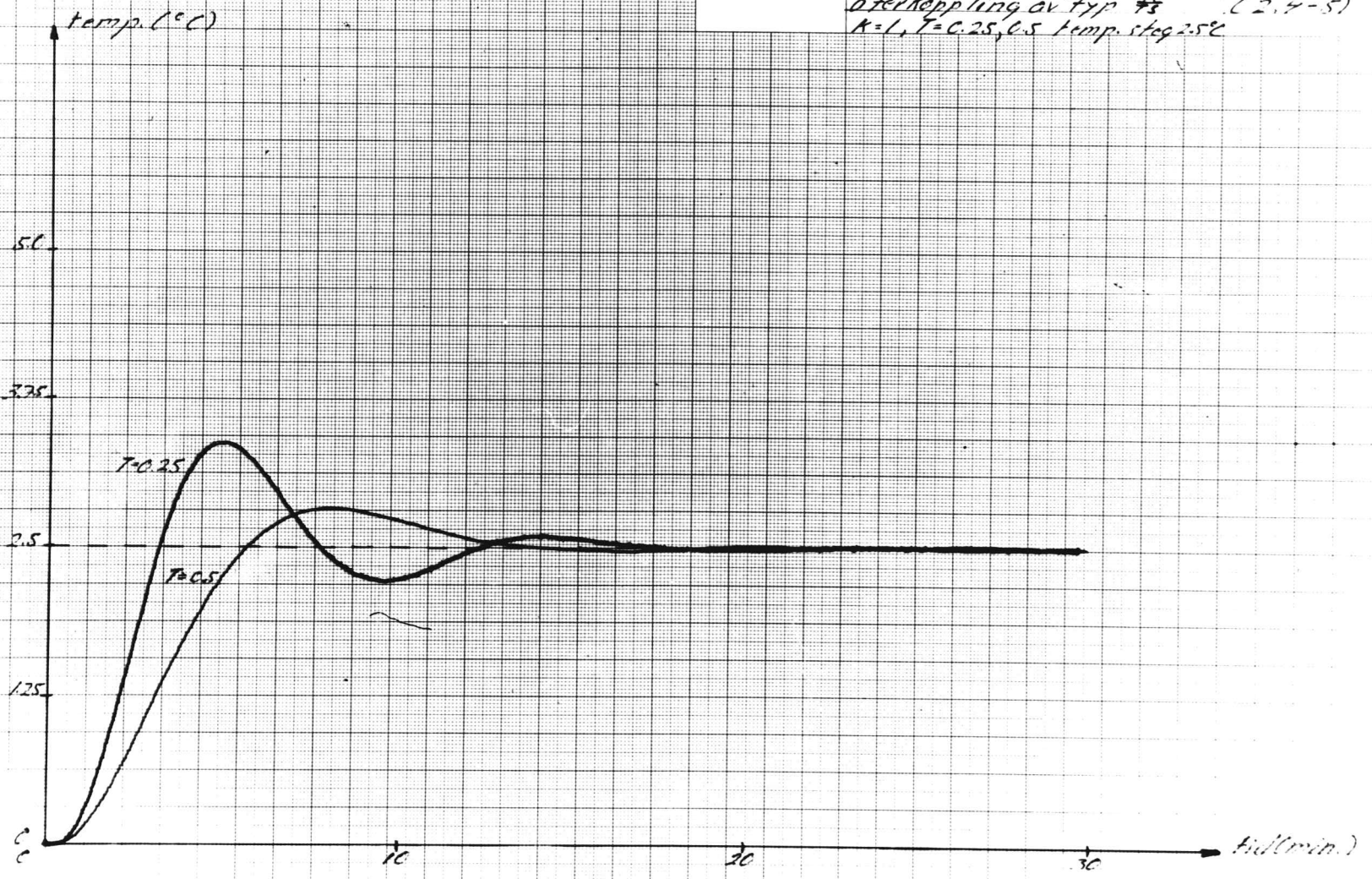




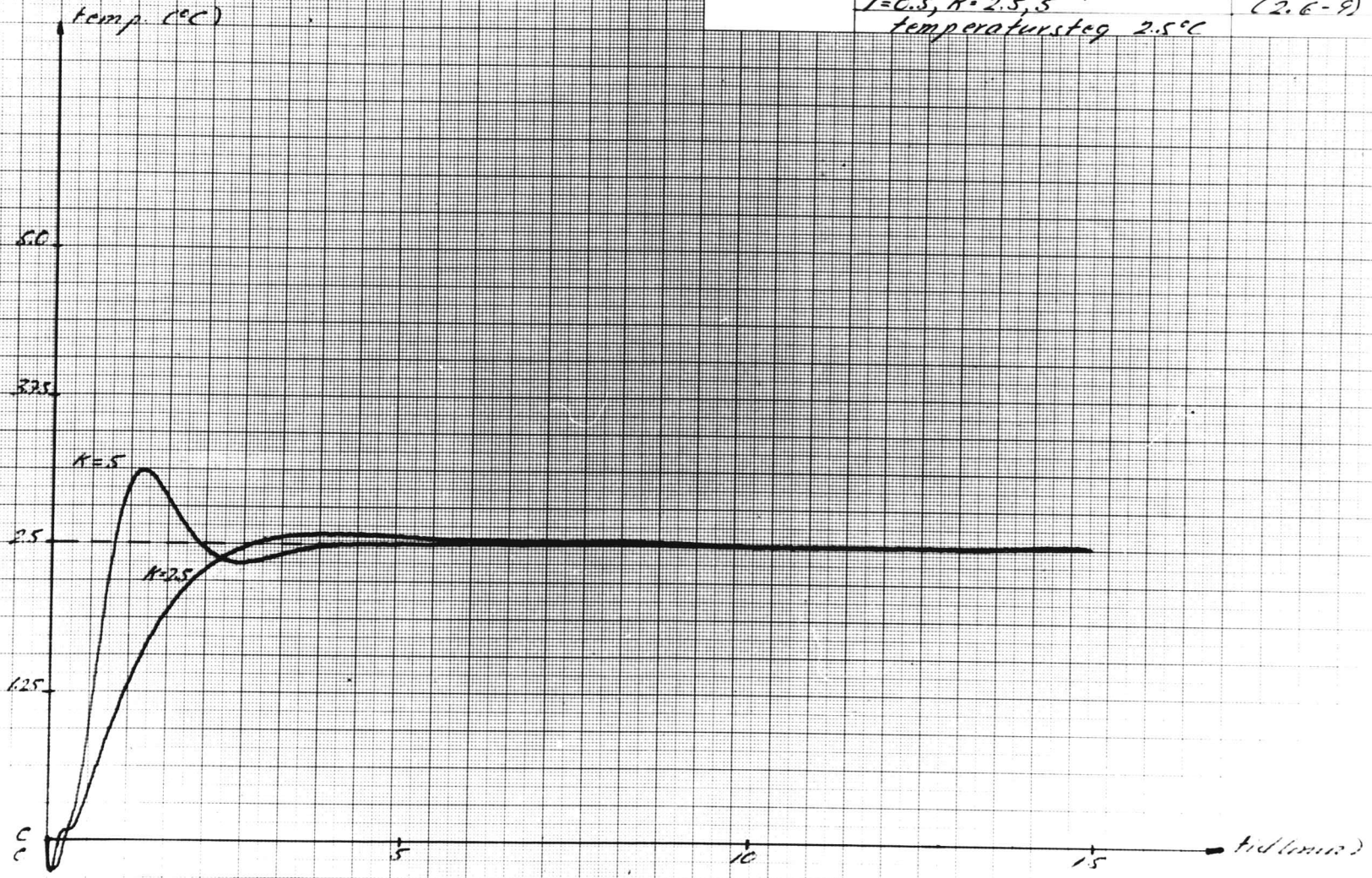
stegsvar i stovens mitt - Diagram  
punkt vid integrerande (i.s)  
återkoppling av typ ~~4~~ (2.7-5)  
 $K=1, T=6.1$ , temp. steg  $2.5^{\circ}\text{C}$



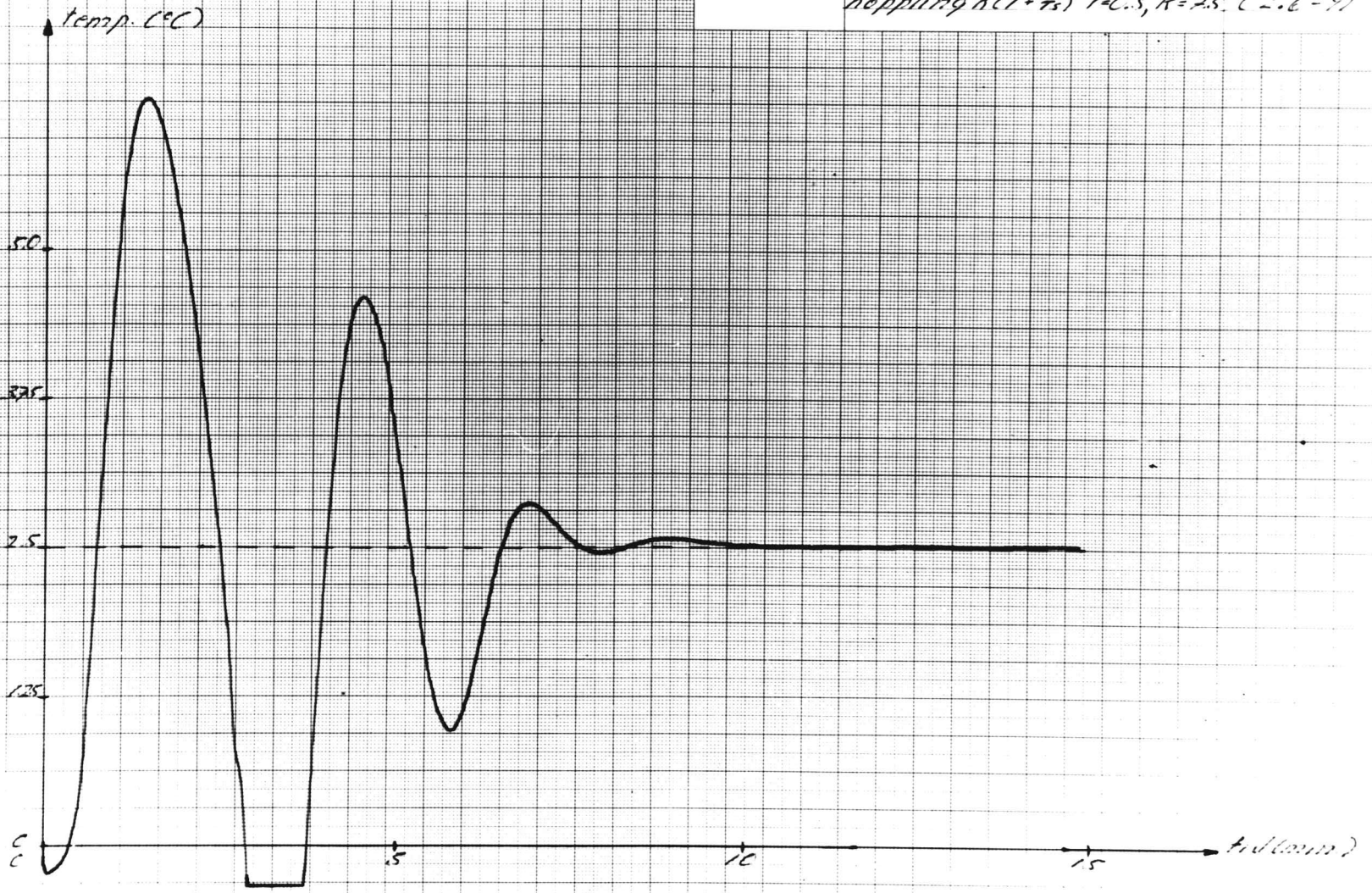
stegsvar i stovens mitt- Diagram  
punkt vid integrerade - 6.7  
österkoppling av typ  $\frac{1}{s}$  (2.4-5)  
 $K=1, T=C.25, 0.5$  temp. steg  $2.5^\circ C$



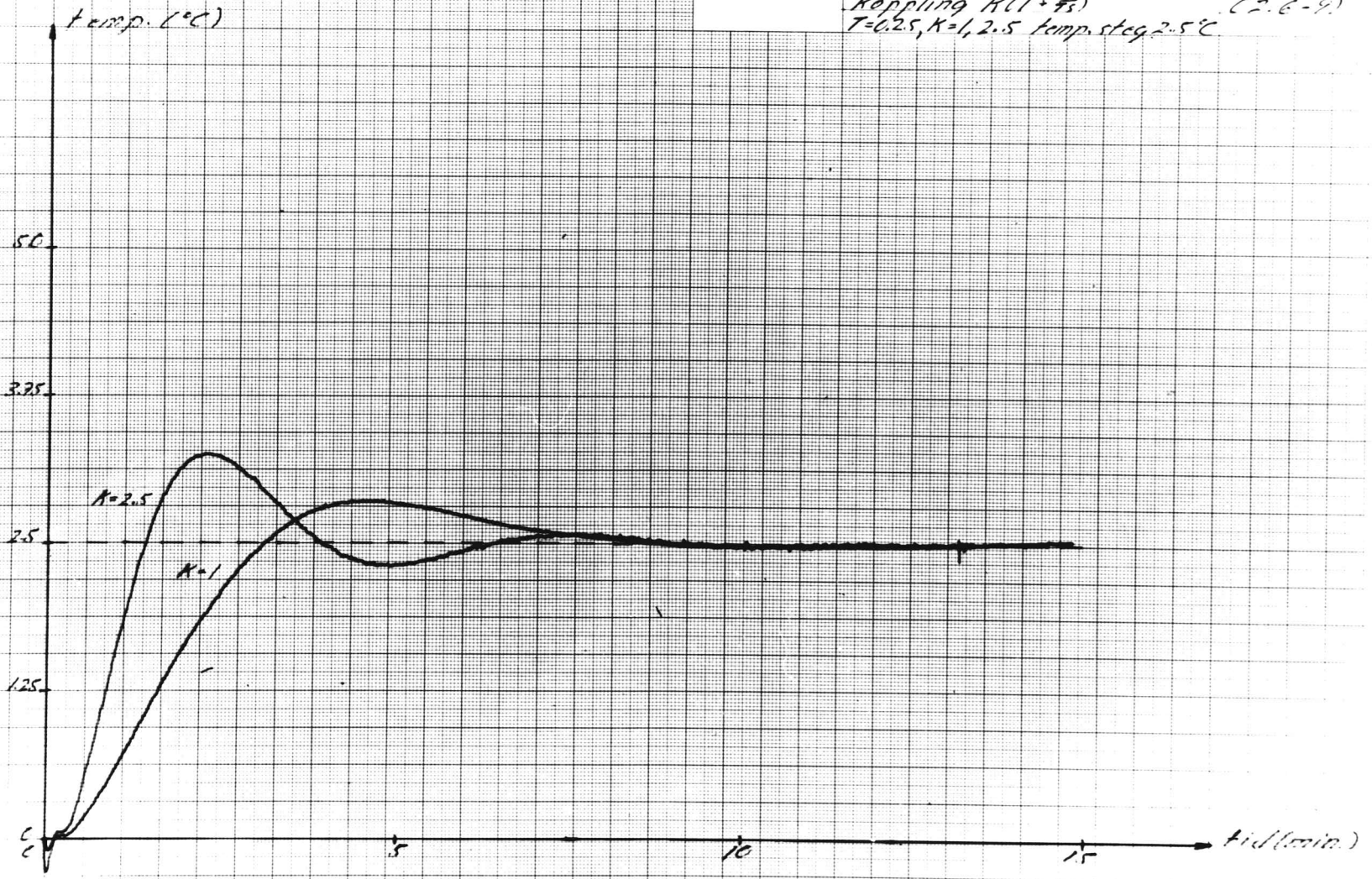
stegvar i stavens mittpunkt Diagram  
vid PI-återkoppling  $K(1+T_i)$  6.5  
 $T=0.5, K=2.5, 5$  (2.6-9)  
temperatursteg  $2.5^\circ\text{C}$



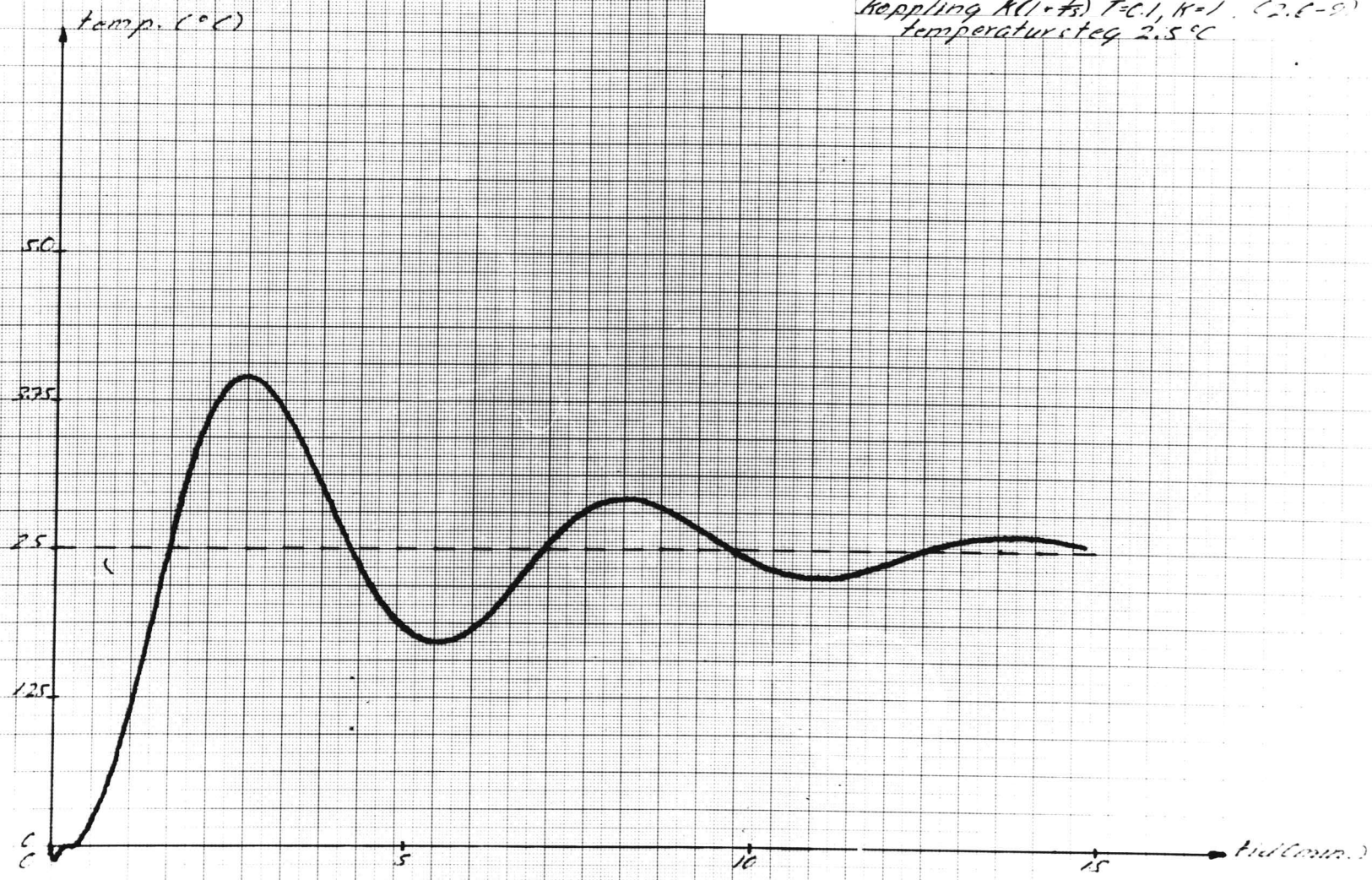
Stegsvar i stavens mitt- Diagram  
punkt vid PI-öfer - 6.6  
koppling K(1 +  $\frac{s}{2}$ ) T=0.5, K=7.5 (2.6-9)



stegsvar i stovens mitt - Diagram  
punkt vid PI-åter - E. 7  
koppling  $K(1 + \frac{s}{4s})$  (2.6-9)  
 $T=0.25, K=1, 2.5$  temp. steg  $2.5^\circ\text{C}$

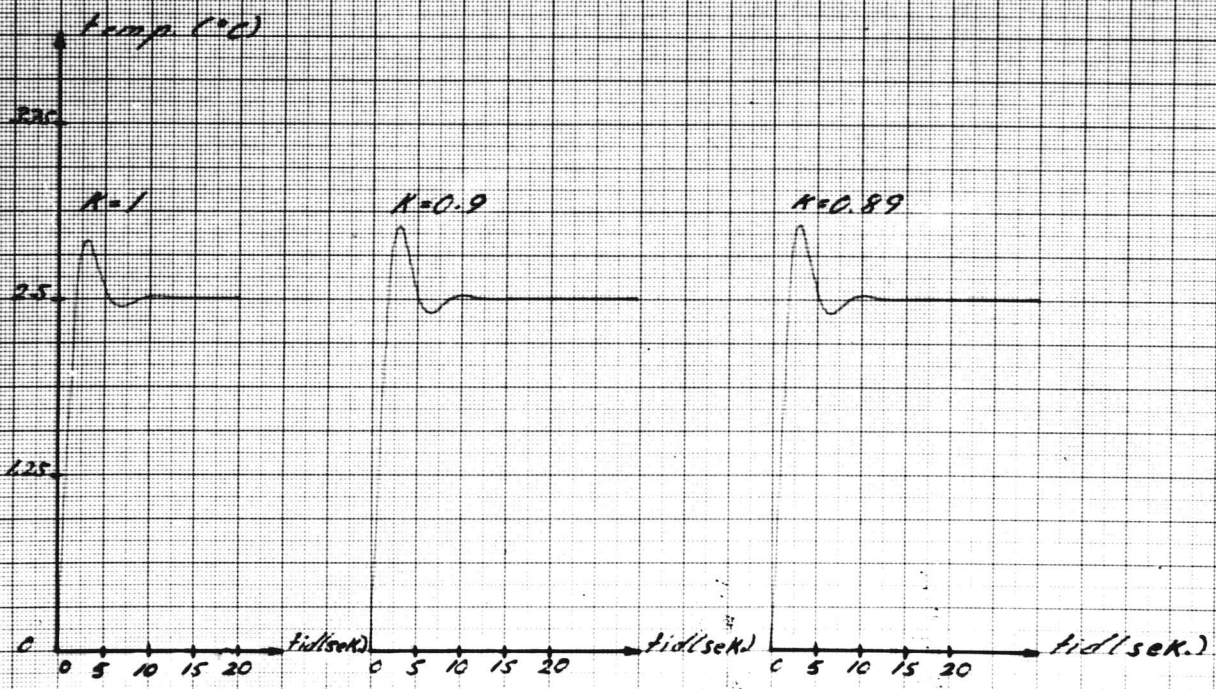


Stegsvår i stovens mitt - Diagram  
punkt vid PI-åter - 6.8  
koppling  $K(1+Ts)$   $T=0.1, K=1$  (2.6-9)  
temperatursteg 2.5°C

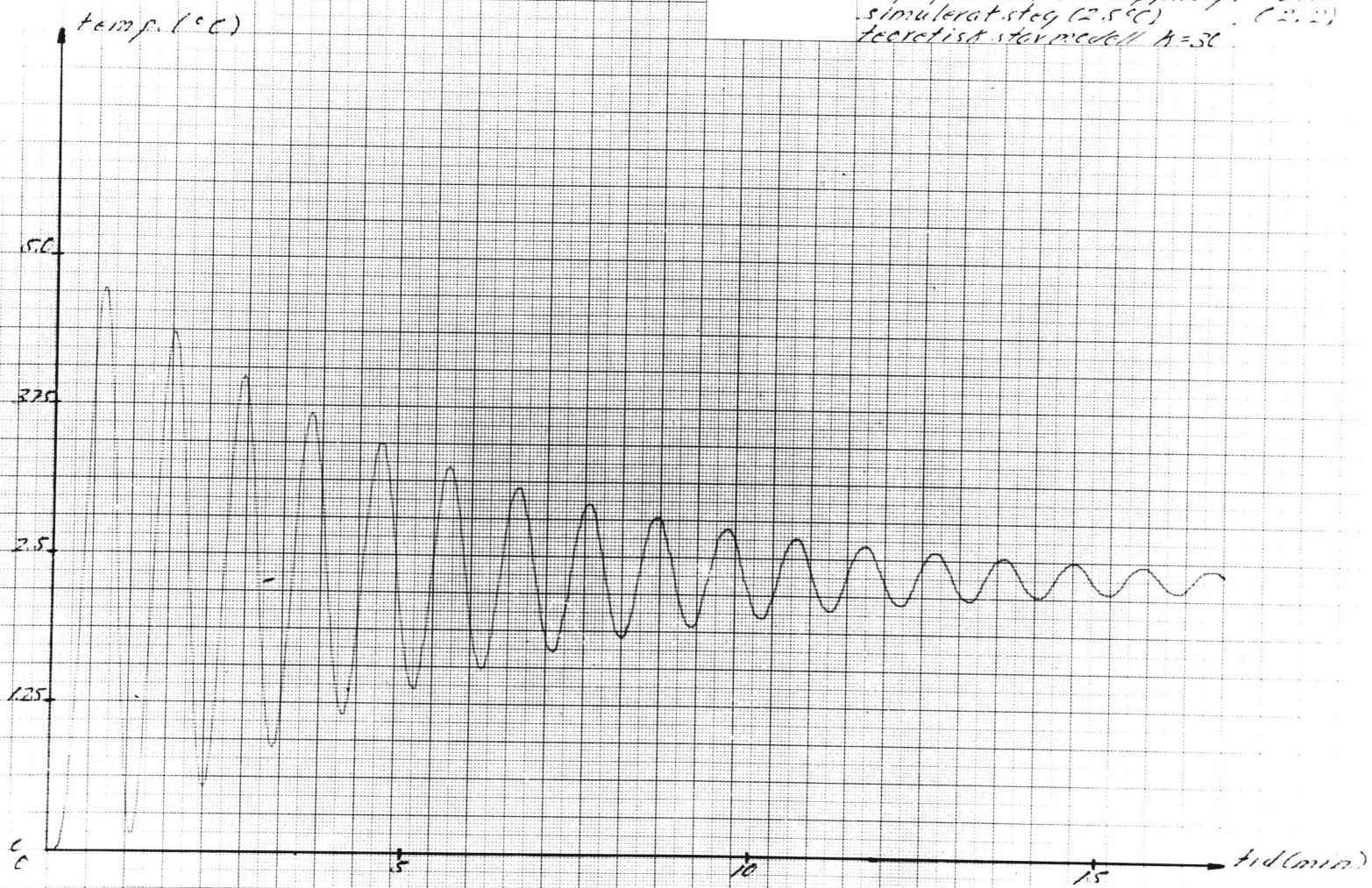


Simulerat temperatur-  
steg, medelst ett  
andra ordningens  
system

Diagram  
6.9

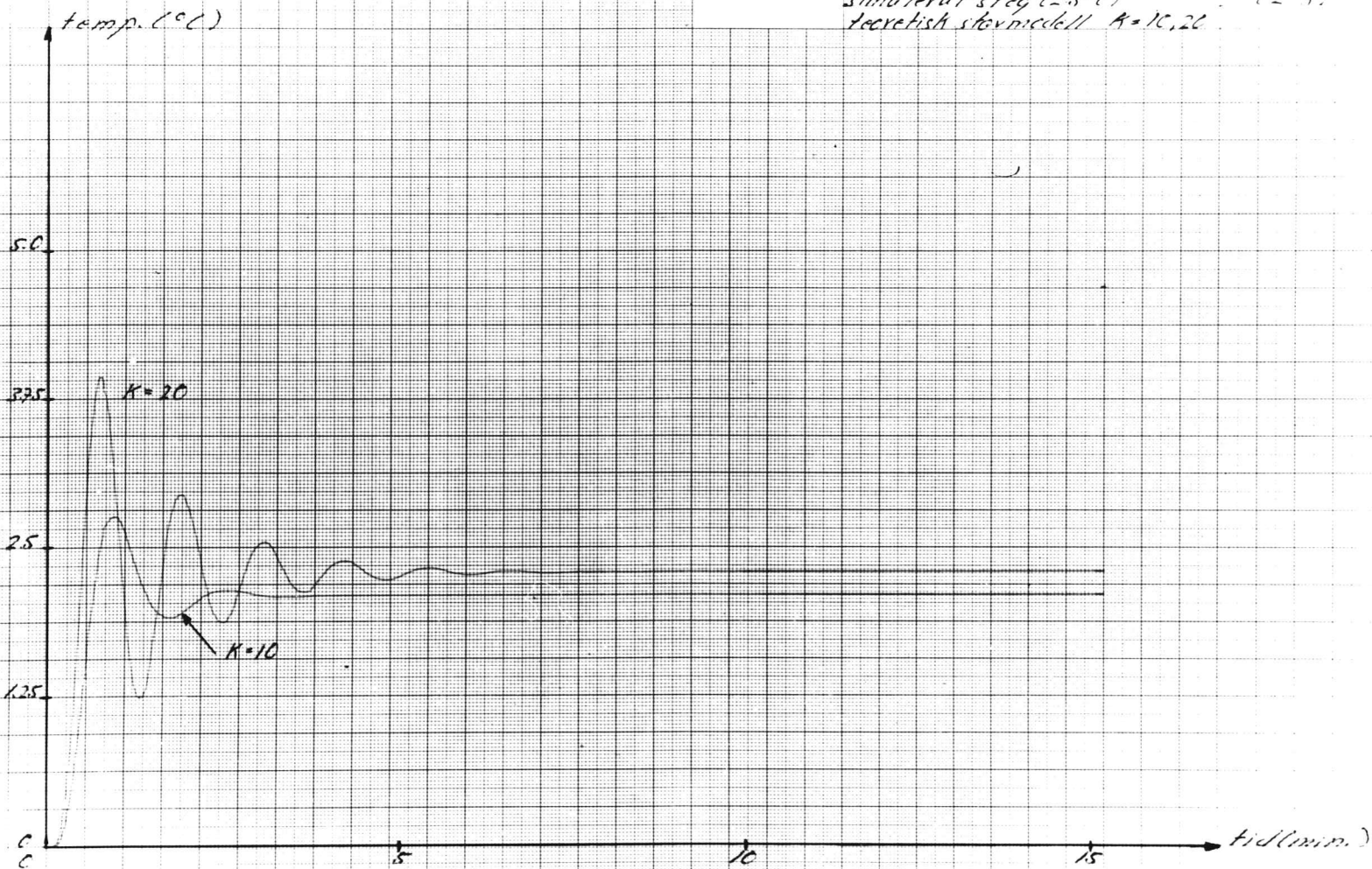


Stegsvar i stovens mittpunkt. Diagram  
vid proportionell återkoppling.  $G_c = 10$   
simulerat steg (2.5°C) (2, 2)  
teoretiskt steg med  $K = 30$ .

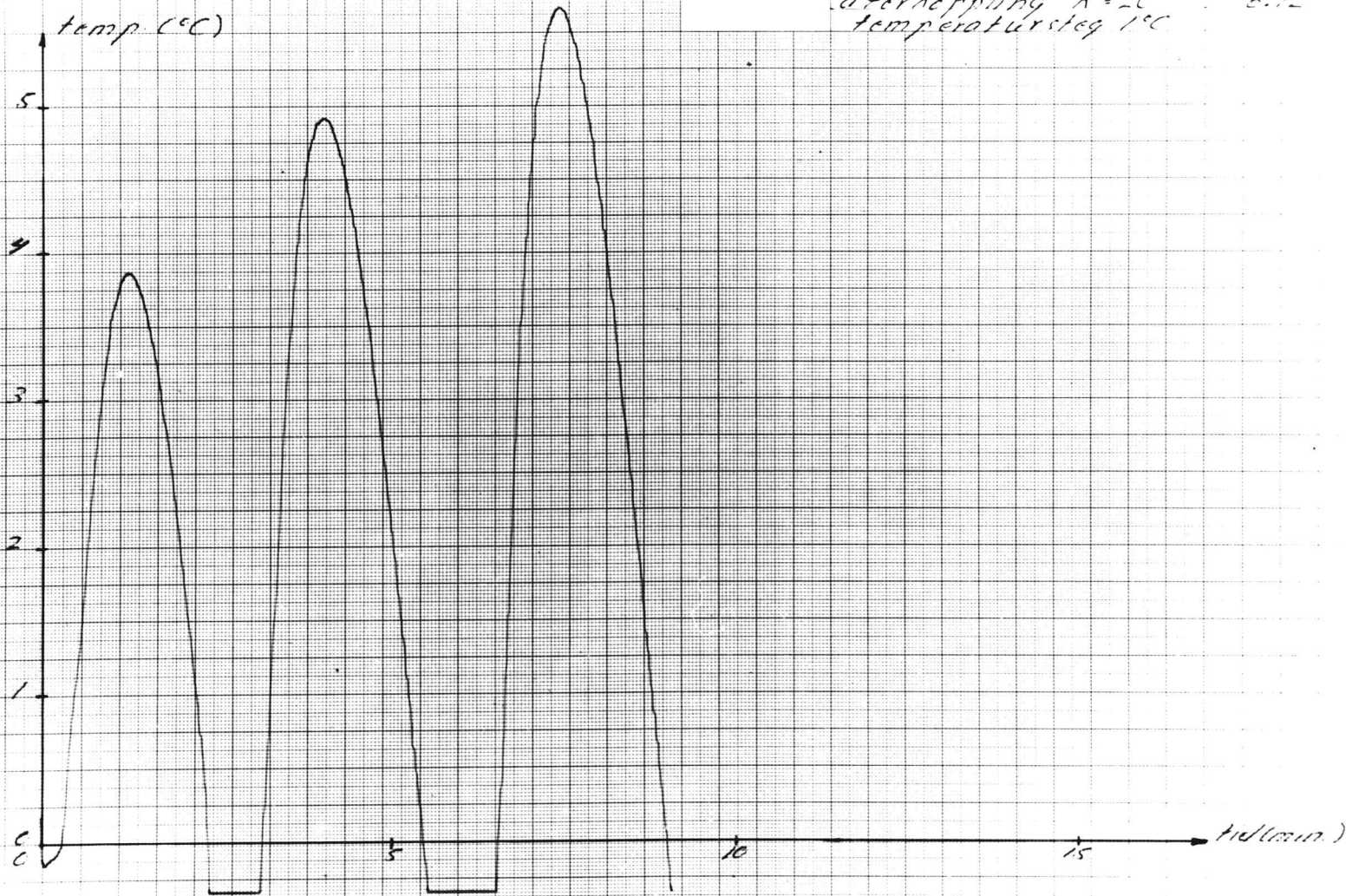




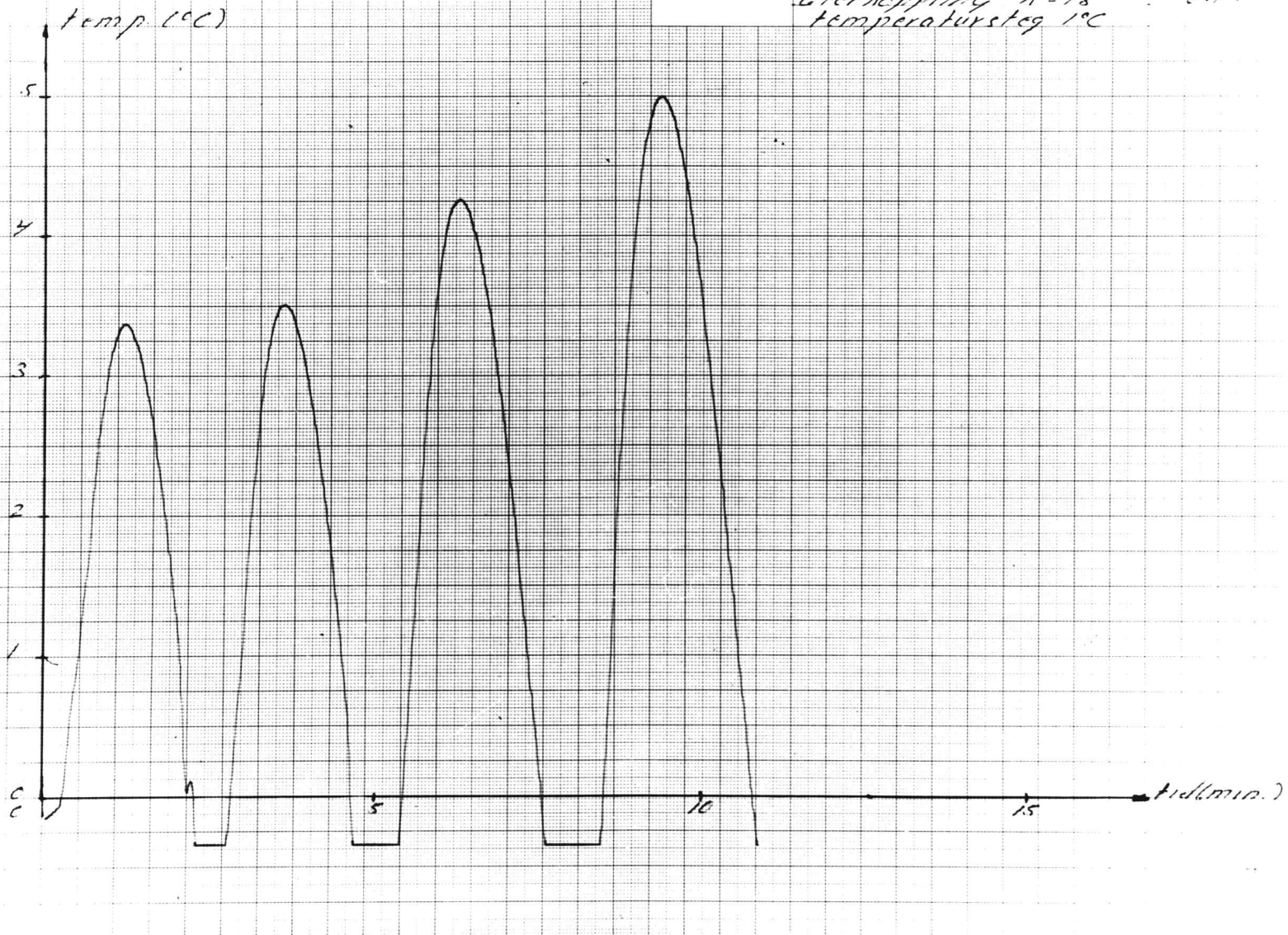
stegsvar i stovens mittpunkt. Distans  
vid proportionell återkoppling - 6.1  
simulerat steg (2.5°C) - (2.3)  
teoretisk stovmedell  $K=10,20$



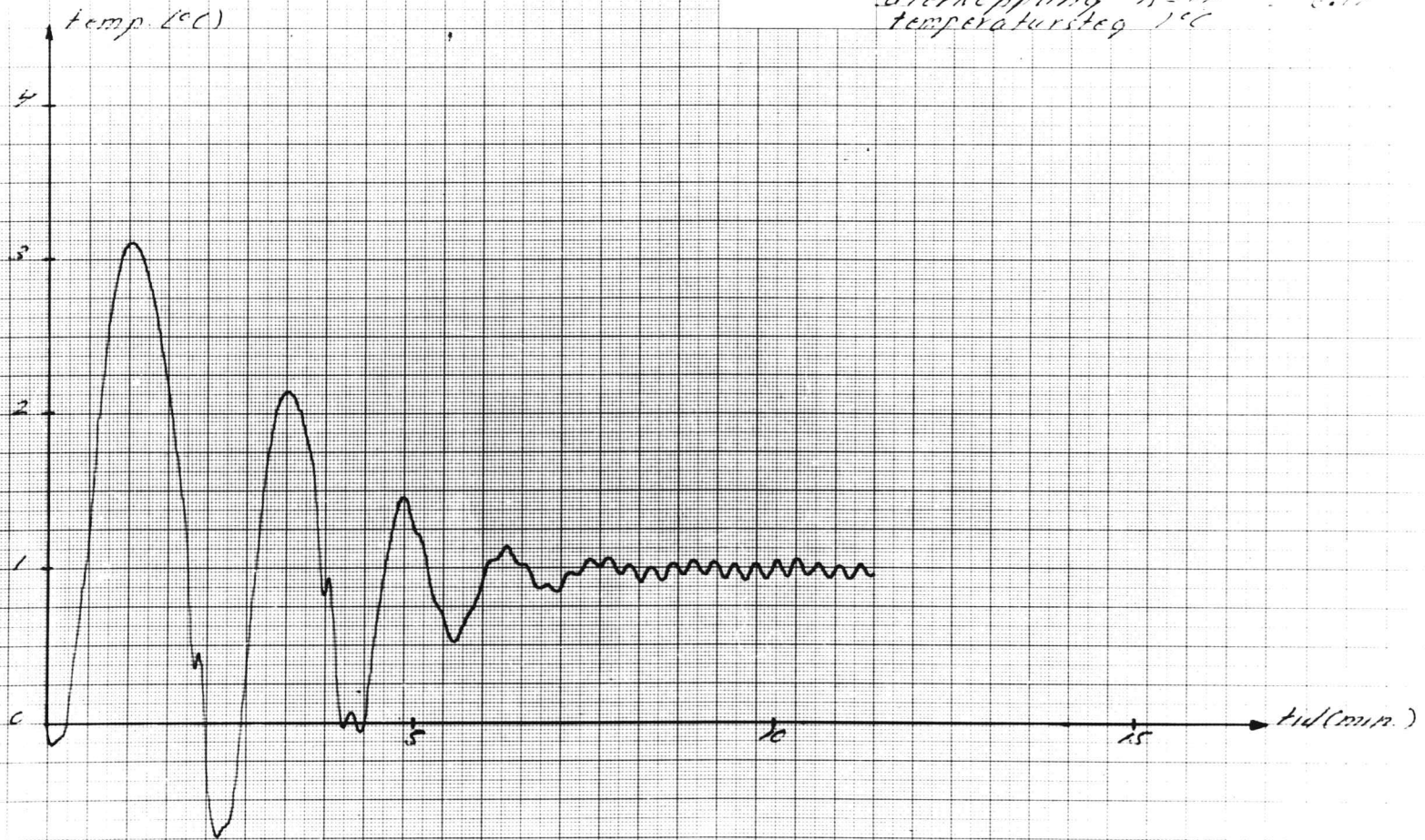
stegvär i staveas mitt-  
punkt vid proportionell Diagram  
förkoppling  $K=20$  B.12  
temperatursteg  $1^\circ\text{C}$



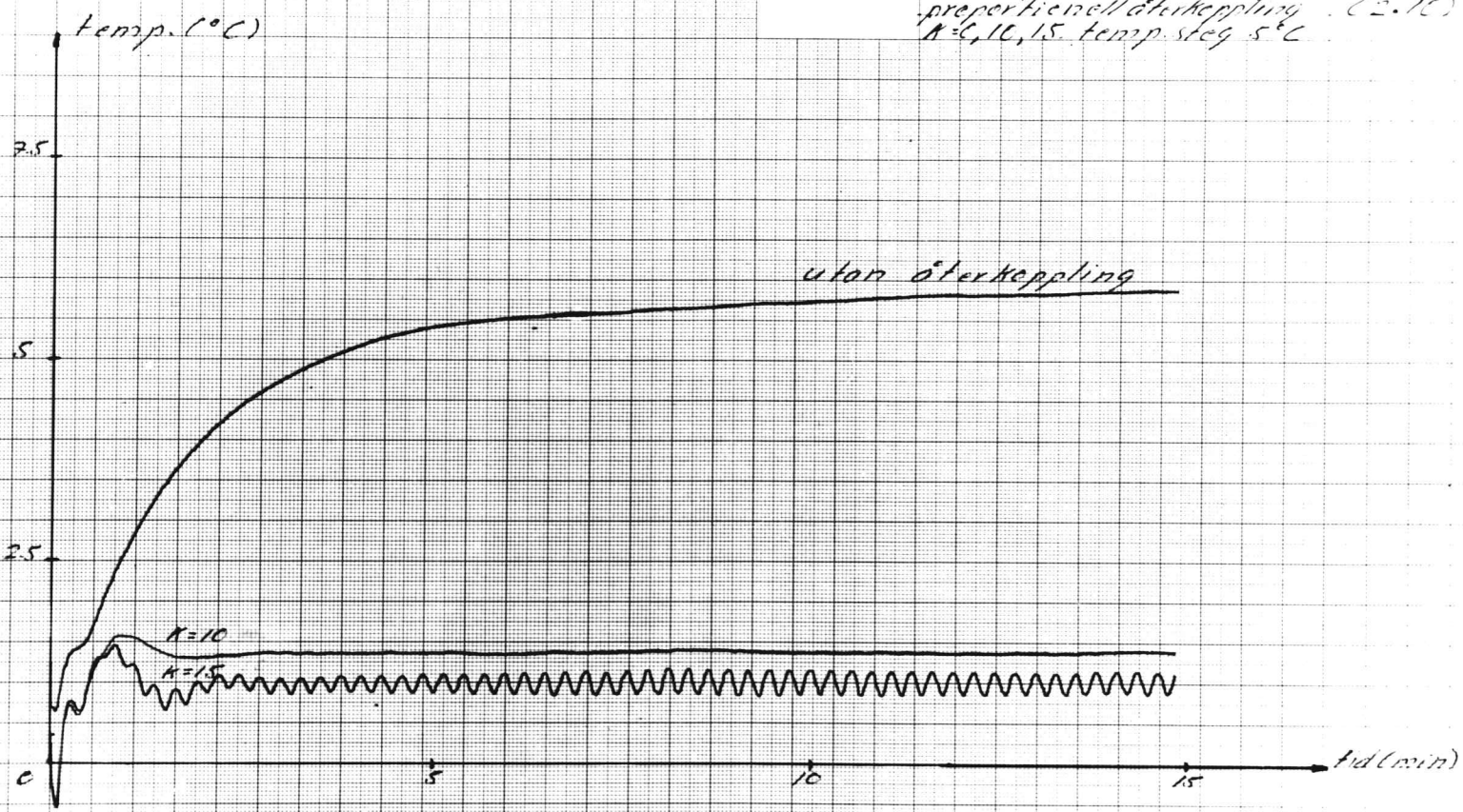
stegsvar i stävans mitt-  
punkt vid proportionell Dragkraft  
Efter koppling  $K=18$  6.15  
temperatursteg  $1^{\circ}\text{C}$



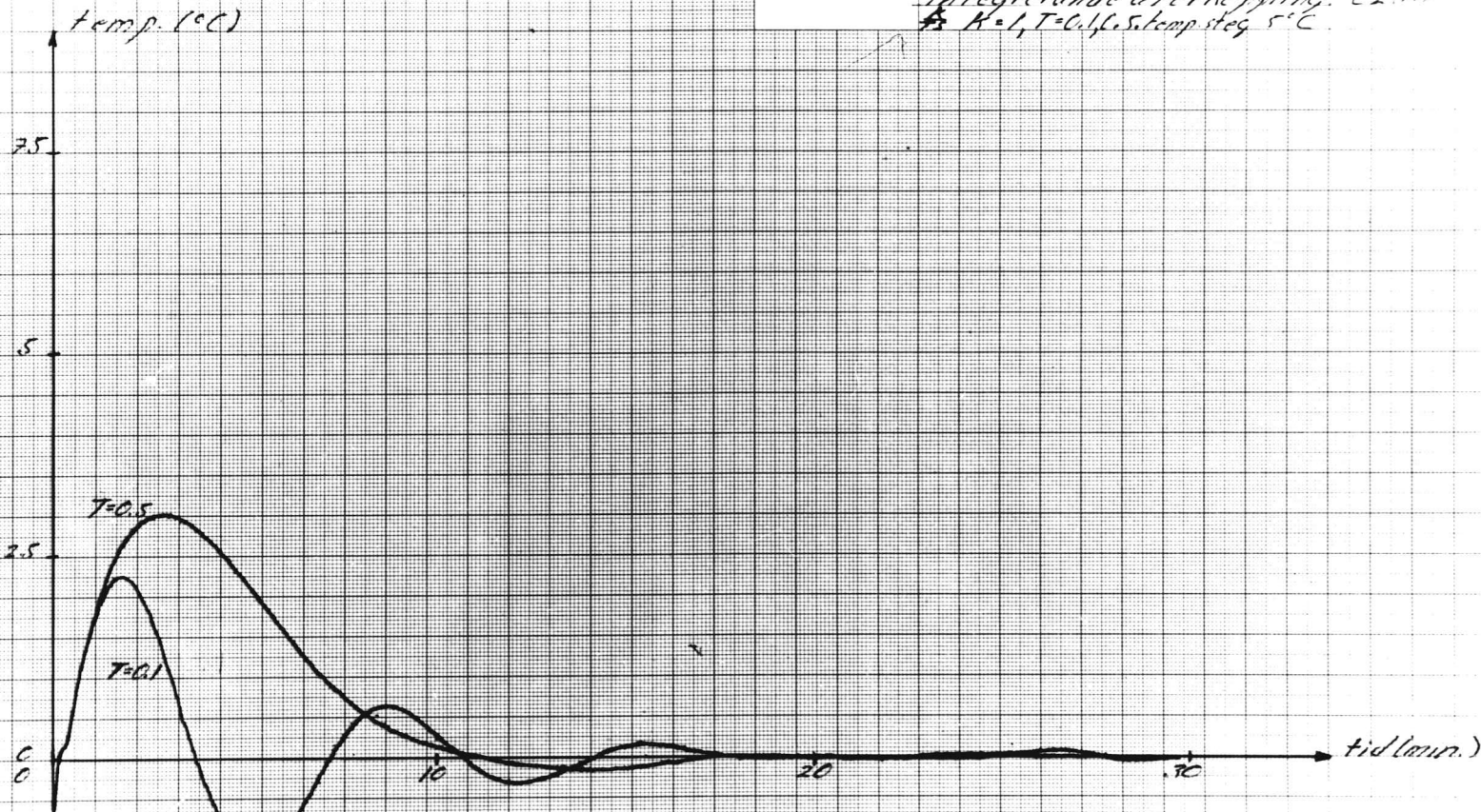
stegsvar i stavens mitt-  
punkt vid proportionell Diagram  
återkoppling  $K=12$  G.17  
temperatursteg  $1^{\circ}\text{C}$



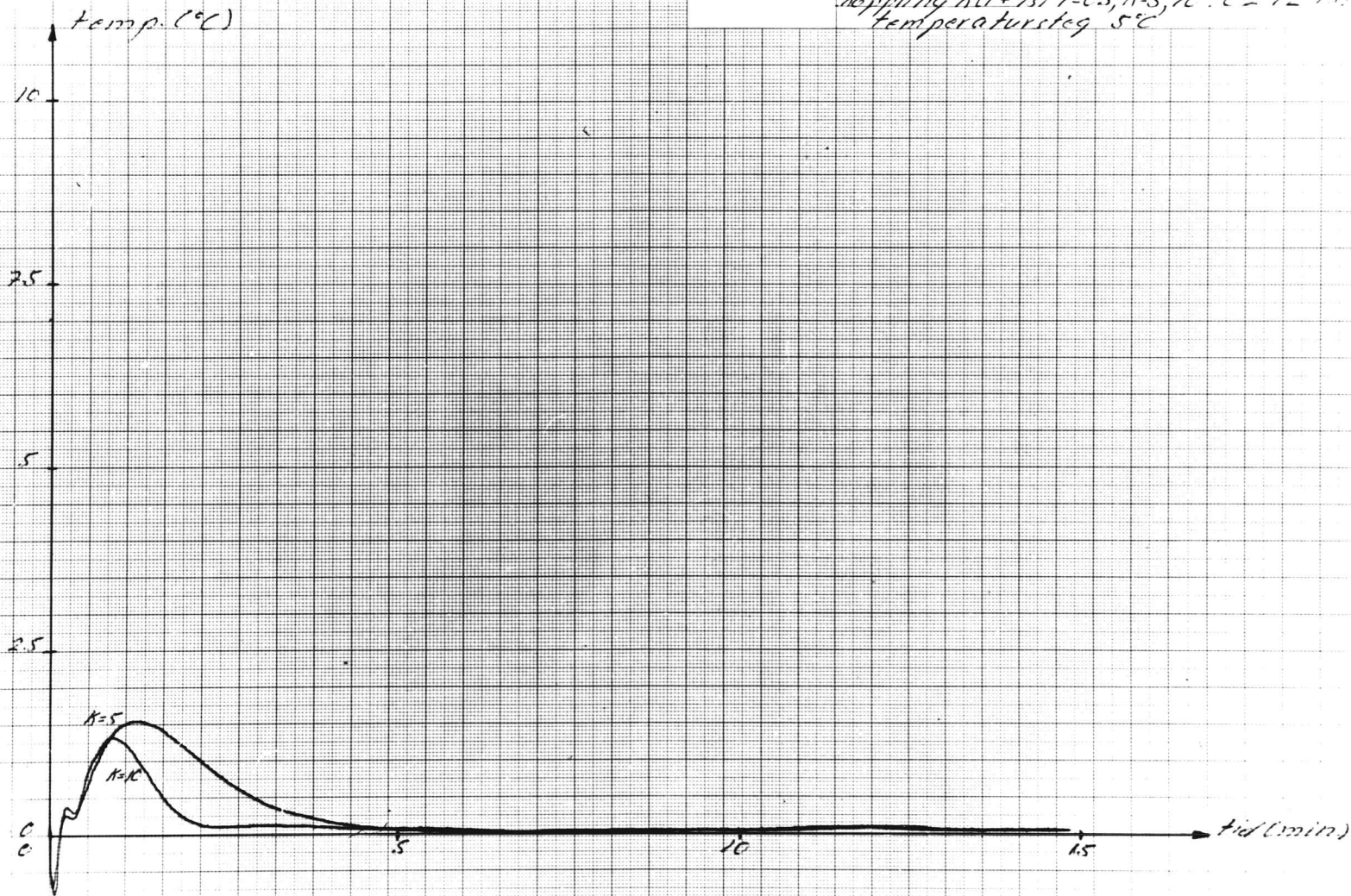
stegstörningens inverkan Diagram  
på mittpunkten vid  
proportionell återkoppling (2.10)  
 $K=6, 10, 15$  temp. steg  $5^\circ\text{C}$



stegförändringens inverkan. Diagram  
på mittpunkten vid  
integrerande återkoppling. (2.11)  
\*  $K=1, T=0.1$  s. temp steg  $5^\circ\text{C}$ .



stegstyrningens inverkan. Diagram  
på rött papper vid PZ-ster. 3.5  
koppling K(1 + Ts) T=0.5, K=5, 10. (2/12-13)  
temperatursteg 5°C



Stegförningens inverkan (Diagram)  
på mittpunkten vid  $T = 2.5$   
återkoppling  $(K=5)$   $T=0.25, K=5, 10$   $T=12-15$   
temperatursteg  $5^\circ\text{C}$

