



Examensarbete

Inomhusklimat i ett kontorsrum

Av

Agnes Andersson

Institutionen för Elektro- och informationsteknik
Lunds tekniska högskola, LTH, Lunds universitet
221 00 Lund, Sverige

Sammanfattning

Det här examensarbetet handlar om inomhusklimatet i ett kontorsrum, men eftersom det finns så många olika faktorer som påverkar inomhusklimatet har det begränsats till faktorerna temperatur och koldioxidnivå. Examensarbetet har gjorts i samarbete med Lindab Innovation Hub, en organisation inom Lindab som arbetar med forskning och utveckling inom inomhusklimat och ventilation.

Med ventilation och värmesystem hålls inomhusklimatet i kontorsrummet inom gränsvärdena, men under tider som det inte befinner sig människor i kontorsrummet (till exempel under natt och helg) är detta inte nödvändigt. Examensarbetets syfte var därför att undersöka om det går mäta upp parametrar som avgör hur snabbt luften i ett rum ändrar temperatur och koldioxidnivå, för att på så sätt kunna avgöra hur lång tid i förväg som ventilation och uppvärmning ska startas om man vet att det ska komma in människor vid en viss tidpunkt. Målet var att en dynamisk modell för att identifiera ett rums parametrar för ändring av temperatur och koldioxidnivå skulle utvecklas och testas.

I examensarbetet har stegsvaret mätts för temperaturen vid 4 mätpunkter i ett kontorsrum från att ett element startades på 3 olika effektnivåer: 750, 1250 och 2000 W. Mätvärdena redovisas i rapporten och de användes också till att beräkna exponentialfunktioner som kan användas för att beskriva temperaturen vid sin respektive mätpunkt. Examensarbetet visar att tidskonstanten kan användas till att reglera uppvärmningen av rummet, så att den har ett visst värde vid en given tidpunkt. Modellen som utvecklats kan alltså användas för att prediktera och reglera temperaturnivån i ett kontorsrum.

Dessutom har två mätningar av hur koldioxidnivå (en mätpunkt) och temperatur (tre mätpunkter) förändrades när rummet utsattes för en laststörning i form av att ett fönster öppnades. Mätvärdena för detta redovisas i rapporten. Till koldioxidnivån beräknades exponentialfunktioner. Resultatet av mätningarna visar att

koldioxidnivån minskar på ett sätt som ganska väl följer en exponentialfunktion, medan temperaturen minskar linjärt. Detta är en enkel modell för hur temperatur och koldioxid korrelerar. Man kan se fönstret som en ventilation i experimentet, och därför visar examensarbetet att det skulle kunna gå att styra både koldioxidnivå och temperatur genom att variera luftflödet.

Nyckelord

Inomhusklimat, kontorsrum, temperatur, koldioxidkoncentration, och ventilation.

Abstract

This bachelor's thesis is about the indoor climate in an office room, but because there are too many factors that affects the indoor climate it has been limited to the factors temperature and carbon dioxide level. The bachelor's thesis has been done in cooperation with Lindab Innovation Hub, an organisation within Lindab which is working with research and development in indoor climate and ventilation.

Using ventilation and heating systems the indoor climate in an office room is kept within the limit values, but during times when there are no people inside the office room (for example during night or weekend) this is not necessary. The purpose of the bachelor's thesis was therefore to investigate if it is possible to measure parameters that determines how fast the air in a room changes in temperature and carbon dioxide levels, in order to determine how long in advance the ventilation and heating systems are to be started if it is known that there will be people at a certain time. The objective was to develop and test a dynamic model which identifies a room's parameters for changes in temperature and carbon dioxide levels.

In the bachelor's thesis the step response has been measured for the temperature at four different measuring points in an office room from the start of a radiator in three different effect levels: 750, 1250 and 2000 W. The measured values are accounted for in the report and they have also been used to calculate exponential equations that can be used to describe the temperature at its respective measuring point. The bachelor's thesis indicates that the time constant can be used to regulate the heating of the room to a certain value at a given time. The developed model could thus be used to predict and regulate the temperature in an office room.

Furthermore, two measurements has been done of how carbon dioxide levels (at one measuring point) and temperature (at three measuring points) changed when the room was exposed of a load disturbance in the form of the opening of a window. These measurements are accounted for in the report. For the carbon dioxide levels exponential equations were calculated. The result of the measurements indicates that the carbon dioxide levels drops in a way that fairly good follows an exponential function, while the

temperature drops linearly. This is a simple model of how temperature and carbon dioxide levels correlates. The window can be viewed as av ventialtion in the experiment, and therefore the bachelors's thesis indicates that it is possible to control both the temperature and the carbon dioxide levels by vary the airflow.

Keywords

Indoor climate, office room, temperature, carbon dioxide concentration and ventilation.

Innehåll

Sammanfattning.....	2
Nyckelord	3
Abstract	4
Keywords.....	5
1. Inledning.....	9
1.1. Bakgrund	9
1.2. Syfte.....	11
1.3. Målformulering	11
1.4. Problemformulering.....	11
1.5. Motivering av examensarbetet	12
1.6. Begränsningar.....	12
2. Teknisk bakgrund	13
2.1. Luftkvalitet och ventilation	13
2.2. Termiskt inomhusklimat.....	14
2.3. Koldioxidkoncentration i ett rum	15
2.4. Överföringsfunktionen för en linjär differentialekvation av första ordningen	16
3. Metod och analys.....	18
3.1. Examensarbetets faser	18
3.1.1. Fas 1: Initial beskrivning	18
3.1.2. Fas 2: Informationsinsamling	18
3.1.3. Fas 3: Testmätningar med temperatursensorer	19
3.1.4. Fas 4: Mätningar av stegsvar för temperaturen.....	20
3.1.5. Fas 5: Mätningar av laststörning	21
3.1.6. Fas 6: Rapportskrivning	21

3.2.	Kommunikationen med företaget.....	21
3.3.	Arbetsprocess.....	21
3.4.	Verktyg	22
3.5.	Mätningar i rummet med en dörr som kan stängas	22
3.6.	Mätutrustning	23
3.6.1.	Temperatursensorerna.....	24
3.6.2.	Elementet	24
3.6.3.	Koldioxidensorn	24
3.7.	Stegsvar med element.....	24
3.8.	Laststörning med fönster	28
3.9.	Källkritik.....	29
4.	Resultat.....	30
4.1.	Stegsvar med konvektorelement	30
4.1.1.	Stegsvar med elementet på 750 W	30
4.1.2.	Stegsvar med elementet på 1250 W	37
4.1.3.	Stegsvar med elementet på 2000 W	44
4.2.	Laststörning med fönster	51
4.2.1.	Laststörning med koldioxidmätaren nära fönstret	51
4.2.2.	Laststörning med koldioxidmätaren ej nära fönstret.....	55
5.	Slutsats	60
5.1.	Stegsvar med element.....	60
5.2.	Laststörning med fönster	61
5.3.	Reflektion över etiska aspekter	62
5.4.	Framtida utvecklingsmöjligheter.....	62
6.	Källförteckning.....	64
7.	Bilagor.....	66

7.1.	Beräkningar som gjordes på testvärdena.....	66
7.2.	Funktioner i C++	73

1. Inledning

I det här kapitlet beskrivs bakgrunden till detta examensarbete: dess syfte, målformulering och problemformulering.

1.1. Bakgrund

Examensarbetet har gjorts i samarbete med Lindab Innovation Hub. Det är en organisation inom Lindab som arbetar med forskning och utveckling inom inomhusklimat och ventilation.

Det här examensarbetet handlar om inomhusklimat i kontorsrum. Utöver de faktorer som tas upp i detta examensarbete finns fler viktiga faktorer för inomhusklimat, såsom ljus- och ljudmiljö. Lindab begränsade examensarbetet till de fem faktorerna luftkvalitet, temperatur, relativ luftfuktighet, partiklar och radon, eftersom det är dessa faktorer de är intresserade av då de påverkas av ventilation.

Med luftkvaliteten i ett rum menar handledaren på Lindab koldioxidnivå, VOC-ämnena och luftföroreningar. VOC står för "Volatile Organic Compound", och är lättflyktiga molekyler av olika sorter som avges från bland annat möbler och byggmaterial [1]. Arbetsmiljöverkets föreskrift, (AFS 2009:2) "Arbetsplatsens utformning" [17], innehåller riktlinjer för hur inomhusklimatet bör vara i ett kontor.

I 16§ i "Arbetsplatsens utformning" [17] rekommenderas att koldioxidnivån i luften ska vara mindre än 1000 ppm, det vill säga att koldioxiden upptar högst 1000 miljondelar (1 promille) av luftens volym. När det gäller inomhustemperaturen, kan det läsas i boken "Bäst i klassen" [2] att den ska vara 23 till 26°C på sommaren och 20 till 24°C på vintern.

Nästa faktor, relativ luftfuktighet, är temperaturberoende och innebär mängd vattenånga i luften genom den maximala mängden vattenånga som skulle kunna finnas i luften vid en given temperatur.

[3] De partiklar som påverkar luftkvaliteten finns i luften och i damm och delas in i tre grupper efter sina storlekar: PM1, PM2.5 och PM10 [4]. För den sista faktorn, radon, är riktvärdet enligt socialstyrelsen [2] att inomhusluft inte får innehålla mer radon än 200 becquerel per kubikmeter, ett mått på sönderfallshastigheten av radon. Ämnena som radon sönderfaller till kallas för radondöttrar och de kan ge lungcancer [18].

Med ventilation och värmesystem kan man hålla inomhusklimatet inom gränsvärdena, men under tider som det inte befinner sig människor i kontorsrummet är det inte nödvändigt. Det gäller till exempel under natten eller helgen. För att spara energi kan ventilation och värmesystem slås av när rummet är tomt. Med hjälp av sensorer som registrerar närvaro i rummet vet systemen när de ska slå på, och då så snabbt som möjligt komma upp/ned till intervallen inom gränsvärdena.

Ett vanligt problem är att människorna som arbetar i kontorsrummet slår ifrån det energisparande systemet eftersom inomhusklimatet är för dåligt för dem att arbeta i under injusteringstiden. Med injusteringstiden menas här tiden från att närvaro i rummet detekteras och systemet slår på, tills att ett bra inomhusklimat uppnåtts. För att lösa detta problem, vill man slå på systemen en stund innan människorna kommer till rummet. Det behövs en modell för att avgöra hur långt tid i förväg systemen ska startas.

Examensarbetets uppgift är att undersöka om det går att hitta en mätmetod för att mäta upp parametrar för ett rums förmåga till ändring av dess luftkvalitet, temperatur, relativ luftfuktighet, partikelkoncentration och radonkoncentration. Resultatet av detta ska kunna användas till att avgöra hur långt tid i förväg som systemen för uppvärmning, kylning och ventilation ska startas, om man vet att det ska komma människor till rummet en viss tid. På så vis ska dessa människor slippa vistas i rummet under injusteringstiden.

U-värde är ett mått på hur snabbt värmeenergi transporteras genom ett tak eller en vägg. Om det är varmare ute läcker värmen in, och om det är kallare ute läcker värmen ut. Mätningarna av parametrarna ska vara oberoende av U-värden på huset.

Om man kan ha ett bra inneklimat i sitt rum hela tiden man är där mår man bättre och presterar bättre, utan att behöva slå av energibesparande system. Detta är nyttan med examensarbetet.

Examensarbetet begränsade sig till mätningar av temperatur och koldioxidnivå. Relativ luftfuktighet, partiklar och radon gjordes inga mätningar på.

1.2. Syfte

Syftet med examensarbetet är att undersöka om det går mäta upp parametrar som avgör hur snabbt luften i ett rum ändrar temperatur och koldioxidnivå.

1.3. Målformulering

En dynamisk modell ska utvecklas och testas för att identifiera ett rums parametrar för ändring av temperatur och koldioxidnivå.

1.4. Problemformulering

Examensarbetet ska besvara följande frågor:

1. Kan en enkel dynamisk modell för rumstemperatur och koldioxidnivå tas fram, som kan vara användbar för att prediktera och reglera dessa storheter?
2. a) Kan korrelationen mellan temperatur och koldioxidhalt i ett rum skattas på ett enkelt sätt?
b) Räcker det att använda luftflöde (ventilation) för att samtidigt styra både koldioxidhalten och temperaturen?

1.5. Motivering av examensarbetet

Examensarbetet valdes för att det verkade mest intressant av de jag valde mellan. Det är viktigt för alla människor med bra luft och lagom temperatur för att må bra. Lindab är intresserade av att kunna utföra beräkningar för hur långt i förväg ventilationssystem ska startas innan människor kommer till ett rum. De vill kunna göra dessa beräkningar med hjälp av mätningar, och utan att behöva ta med U-värden och vilka material väggar och tak är byggda av i beräkningarna.

1.6. Begränsningar

Examensarbetet ska begränsas till mätningar av temperatur och koldioxidnivå.

2. Teknisk bakgrund

Inomhusklimatet består av de fyra delarna termiskt inomhusklimat, luftkvalitet, ljudmiljö och ljusmiljö. De delar som tas upp i detta examensarbete är termiskt inomhusklimat och luftkvalité. I ”Bäst i klassen - en bok om lönsamt inneklimat” [2], står att människor märker inte ett bra inomhusklimat, men de märker alltid ett dåligt. Inomhusklimatet påverkas av faktorer såsom uteklimatet, aktiviteter inomhus och material, konstruktion och möblering av byggnaden.

I detta kapitel beskrivs luftkvalitet, ventilation, värmetransport och koldioxidkoncentration i ett rum. Dessutom redogörs för beräkningar för överföringsfunktionen till en linjär differentialekvation av första ordningen, eftersom det kommer användas till resultatet i rapporten.

2.1. Luftkvalitet och ventilation

Luftkvalitet är ett mått på luftens halt av föroreningar. Några föroreningar som kan ge hälsoproblem är formaldehyd, radon, kolmonoxid, kvävedioxid, ozon och partiklar. [2]

På de flesta platser är utomhusluftens föroreningshalt låg, och luftkvaliteten därför bra, men inomhus blir luftkvaliteten snabbt sämre när människor befinner sig där genom att människorna avger koldioxid och partiklar. Olika apparater, möbler och textilier (till exempel när man bäddar en säng) kan också avge föroreningar. För att hålla luftkvaliteten på en acceptabel nivå behöver inomhusluften kontinuerligt bytas ut mot luft utifrån med ett ventilationssystem. [15]

Det finns två sorters ventilationssystem: frånluftssystem och från- och tilluftssystem. Frånluftssystem hämtar luft utifrån genom ventiler och den gamla luften åker ut antingen genom självdrag (då kallas det självdragsventilation) eller genom frånluftsfläktar. I ett från- och tilluftssystem behandlas luften som tillförs först genom till exempel uppvärmning eller filtrering. [15]

Ventilation mäts i luftflöde, som är antal luftomsättningar per timme. Enligt Boverket måste luftflödet vara minst 0,5 omsättningar per timme. [15]

2.2. Termiskt inomhusklimat

Den viktigaste faktorn för termiskt inomhusklimat är temperaturen. Temperaturen på olika platser i ett rum bestäms av hur mycket värmeenergi som finns där.

Värmeenergi transporteras på tre sätt: med ledning, konvektion och strålning. [5]

Ledning i material i fast form sker genom kollisioner av partiklar och diffusion, till exempel genom en vägg med olika temperaturer på vardera sidan. Värmetransporten genom en vägg beräknas med Fouriers lag i ekvation 1, där Φ är värmeflödet, λ är en konstant för väggens termiska konduktivitet, A är väggens area, ΔT är temperaturskillnaden och d är väggens tjocklek. Ekvation (1) tar inte hänsyn till att temperaturen ändras med tiden i ett rum (ΔT blir mindre). [5]

$$\Phi = \lambda \frac{A\Delta T}{d} \quad (1)$$

Konvektion sker genom material i flytande form eller gasform. När man startar ett element i ett rum, värms luften intill elementet. Den uppvärmda luften stiger till följd av att varm luft har lägre densitet än kall luft. När luften rör sig genom rummet svalnar den av, och sjunker till golvet och tillbaka till elementet. Denna typ av konvektion kallas naturlig konvektion och man behöver ingen fläkt för att sprida värmen i rummet. Den andra sortens konvektion kallas för "forced" och sker med till exempel en fläkt. [5]

Strålning sker med elektromagnetiska vågor som avges från alla kroppar, till exempel från solen. [5]

I artikeln "*Numerical analysis of air flow, heat transfer, moisture transport and thermal comfort in a room heated by two-panel radiators*" [6] presenteras en matematisk modell som författarna har

skapat av ett rum med ett fönster, en dörr, en person och ett element. De jämför hur bland annat luftflöden och temperaturen i olika delar av rummet blir vid olika inställningar av parametrarna. Parametrarna som används i modellen är väggens termiska konduktivitet (λ från ekvation 1), fönstrets tjocklek, fönstrets termiska konduktivitet, och elementets ytemperatur. Analysen gjordes när rummet var i ett stationärt tillstånd. Deras modell visar hur temperaturen kan skilja sig mellan olika platser i rummet.

I artikeln presenteras tredimensionella bilder av lufthastighet och temperatur. På bilderna kan man se att det är varmare luft närmre taket och att det blir kallare ju längre ned längs fönstret (kallras).

2.3. Koldioxidkoncentration i ett rum

Enligt Teleszewski och Gładyszewska-Fiedoruk [7] kan koldioxid användas som en indikator för luftkvalitet i ett rum där människor befinner sig. Om koldioxidkoncentrationen är inom gränsvärdet (högst 1000 ppm) kan man även anta att koncentrationen av VOC (volatile organic compound, lättflyktiga molekyler) och luftföroreningar är inom sina respektive gränsvärden.

I deras artikel "The concentration of carbon dioxide in conference rooms: a simplified model and experimental verification" [7] beskrivs och testas också en formel för koldioxidkoncentrationen i ett klassrum med självdragsventilation (ett ventilationssystem som bygger på att varm luft stiger). I artikelförfattarnas test regleras lufttillförseln med ett fönster som öppnas olika mycket. De konstaterade en linjär ökning med avseende på tiden av koldioxidkoncentrationen i klassrummet, och att deras test inte varade tillräckligt länge för att jämvikt skulle uppstå, det vill säga att det bildas lika mycket koldioxid som avlägsnas genom ventilationen. Formeln de har kommit fram till är ekvation (2), där c är koldioxidkoncentrationen, c_0 är den initiala koldioxidkoncentrationen, B är en konstant, n är antalet personer i rummet, V är rummets volym, t är tiden och k är en konstant som anger hur snabbt luften i rummet byts ut.

$$c = \frac{Bntk}{V} + c_0 \quad (2)$$

2.4. Överföringsfunktionen för en linjär differentialekvation av första ordningen

Enligt Thomas [19] blir stegsvaret för ett system som kan beskrivas med en linjär differentialekvation av första ordningen en exponentialfunktion. Detta gäller eftersom överföringsfunktionen till ett första ordningens system är ekvation (3) och insignalen för stegfunktionen med elementets effekt P är ekvation (4), vilket examensarbetaren har beräknat ger utsignalen ekvation (5).

I detta examensarbete har ett system som består av ett rum med effekten på ett element som insignal och temperaturen i rummet som utsignal modellerats på detta sätt. Ifall denna överföringsfunktion passar till systemet eller inte, kommer att diskuteras i kapitel 5.

Stegfunktionen när elementet startas mäts för att karaktärisera systemet.

$$G(s) = \frac{k_0}{1 + Ts} = \frac{k_0}{T} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{T}} \quad (3)$$

$$U(s) = \mathcal{L}(u(t)) = \mathcal{L}(P \cdot \theta(t)) = P \cdot \frac{1}{s} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= \mathcal{L}^{-1}(G(s) \cdot U(s)) = \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{k_0}{T} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{T}} \cdot P \cdot \frac{1}{s}\right) \\ &= k_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \theta(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Ett intressant värde i en stegfunktion är tidskonstanten, T , som är det värde på tiden då temperaturen blir lika med $0,63k_0$, alltså då värdet i exponenten blir -1 . Därför gäller ekvation (7) för

tidskonstanten, där c är koefficienten från ekvation (6). Tidskonstanter beräknas för resultatet i kapitel 4.

$$y(t) = a + be^{-ct} \quad (6)$$

$$T = 1/c \quad (7)$$

Tidskonstanten och k_0 illustreras med skissen i figur 1.

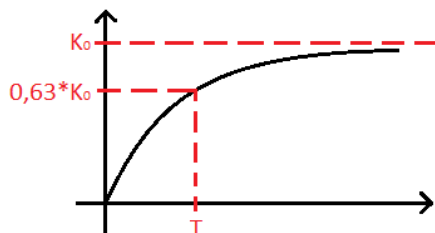


Fig. 1. Skiss över T och k_0 i en exponentialfunktion.

3. Metod och analys

I det här kapitlet beskrivs hur examensarbetet har genomförts och den kritiska granskningen av de källor som använts under examenarbetet.

3.1. Examensarbetets faser

Detta examensarbete är indelat i sex faser: initial beskrivning, informationsinsamling, testmätningar med temperatursensorer, mätningar av stegsvar för temperaturen, mätningar av laststörning och rapportskrivning. De olika faserna kan ses i Gantt-schemat i figur 2.

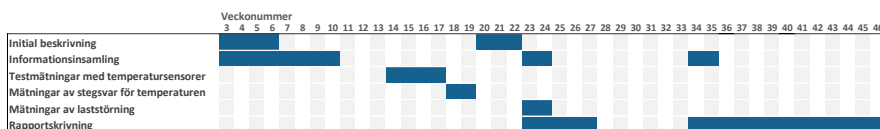


Fig. 2. Gantt-schema för examensarbetets olika faser.

3.1.1. Fas 1: Initial beskrivning

Under fasen ”Initial beskrivning”, definierades examensarbetets innehåll, hur det skulle utföras och vilka begränsningar som skulle gälla. Denna fas innehöll möten och mejlkonversationer med handledarna på Lindab Innovation Hub och på universitetet.

3.1.2. Fas 2: Informationsinsamling

Fasen ”Informationsinsamling” skedde under tre olika tidpunkter i examensarbetet: vecka 3 till 10, vecka 23 till 24 och vecka 34 till 35.

- Under vecka 3 till 10 lästes textmaterial som erhöles från handledarna på Lindab Innovation Hub. Det är texter om

inomhusklimat från deras blogg [8], boken ”Bäst i klassen” [2] och en e-bok som de rekommenderade som hette ”Cooling Load Calculations and Principles” [9]. Dessutom inhämtades information på Folkhälsomyndighetens hemsida [10] rörande riktlinjer för inomhusklimat.

- Under vecka 23 till 24 lästes i artiklar och böcker ref [6, 7 och 11-15]. Det som lästes handlar temperatur och koldioxid i byggnader.
- Under vecka 34 till 35 uppdaterades inledning (kapitel 1) och teknisk bakgrund (kapitel 2) i denna rapport med hjälp av källorna från tidigare vecka 3-10 och 23-24 och några nya källor. Alla källorna redovisas i kapitel 6.

3.1.3. Fas 3: Testmätningar med temperatursensorer

Under fasen ”Testmätningar temperatursensor” gjordes testmätningar med en av temperatursensorerna för att examensarbetaren skulle lära sig hur mätutrustning och tillhörande program fungerade. Testmätningarna utfördes i ett rum i examensarbetarens lägenhet. Ingången till rummet har ett dörrhål utan en dörr isatt, vilket betydde att värmen från elementet spreds till hall och kök utanför rummet. Volymen som värmen från elementet spreds ut på var därför den sammanlagda volymen av testrummet, hallen och köket, en approximerad volym på 80 m³.

Temperatursensorn placerades ut i rummet och elementet (se avsnitt 3.6.2) startades på 750 W i första omgången och 1250 W i andra omgången, vilka var elementets två lägsta effektnivåer.

Examensarbetaren anpassade en övningsuppgift i Styr- och reglerteknik om uppvärmning av en elektrisk ugn [14] till en modell för uppvärmning av rummet där testet utfördes. Beräkningarna för denna första modell redovisas i bilaga 7.1. De värden som uppmätts med temperatursensorn under testmätningen användes till att undersöka hur väl denna modell stämde genom jämförelse av tidskonstanten mellan de uppmätta värdena och de beräknade. Mätvärdena och jämförelsen finns redovisade i bilaga 7.1.

Överensstämmelsen mellan de uppmätta och de beräknade tidskonstanterna var mycket dålig.Handledaren för examensarbetet och examensarbetaren kom fram till att det berodde på att i beräkningarna för ugnen antas perfekt omrörning av luften, vilket inte kan antas för testrummet (med hall och kök). Utan perfekt omrörning i rummet är tidskonstanen beroende av hur nära elementet temperatursensorn befinner sig.

Det konstaterades att det var bättre att göra mätningarna i ett mindre rum som det gick att stänga dörren till, så att inte värmen spreds över lika stor volym. Om det är mindre volym på rummet blir det större temperaturskillnader vid uppvärmningen från elementet och därför cirkulerar luften mer. Det rummet som användes istället beskrivs i avsnitt 3.5.

Tidskonstanen är fortfarande beroende av hur nära elementet sensorn är placerad, men genom att använda fler temperatursensorer än en, tänkte examensarbetaren jämföra skillnaden från olika avstånd till elementet. I senare mätningar användes fyra stycken temperatursensorer.

3.1.4. Fas 4: Mätningar av stegsvar för temperaturen

Under fasen ”Mätningar stegsvar” gjordes uppmätningar av temperaturens stegsvar i det nya rummet från start av ett element på 750, 1250 och 2000 W, och minst 2 timmar framåt (detta ansågs som en lämplig tid eftersom temperaturkurvorna började jämnas ut då). Hur mätningarna gjordes redovisas i avsnitt 3.8, och resultaten redovisas i avsnitt 4.1. I dessa mätningar var systemet öppet, och stegsvaret mättes för att se hur snabbt systemet var.

Tidskonstanten från stegsvaret kan användas till att styra temperaturen så att den har ett visst värde vid en given tidpunkt. Detta kan göras antingen genom att använda öppen styrning och starta uppvärmningen minst 3 tidskonstanter innan den givna tidpunkten (då kommer 95% av temperaturändringen ha skett vid den givna tidpunkten), eller att använda en PI-regulator med tidskonstanen så att temperaturen kan uppnås snabbt.

3.1.5. Fas 5: Mätningar av laststörning

Under fasen ”Mätningar laststörning” gjordes mätningar av temperaturen och koldioxidnivån i rummet från att fönstret i rummet öppnades tills att koldioxidnivån nått jämvikt. Det öppna fönstret kallas i rapporten för en laststörning i systemet (rummet). Hur dessa mätningar gjordes redovisas i avsnitt 3.9 och resultaten redovisas i avsnitt 4.2.

Laststörningens inverkan undersöktes för att veta hur snabbt och hur mycket temperaturen sjönk till följd av störningen. Målet med mätningarna är att ta reda på hur koldioxidnivå och temperatur var för sig reagerar på en sådan här laststörning.

3.1.6. Fas 6: Rapportskrivning

Under fasen ”Rapportskrivning” skrevs denna rapport.

3.2. Kommunikationen med företaget

Kommunikationen med Lindab har skett på möten (cirka 5 stycken i början och mitten av examensarbetet) i deras kontor och i mejlkonversationer. På mötena och i mejlkonversationerna bestämdes tillsammans med med Jan Behrens (ventilationsexpert och handledare) vad som skulle göras i examensarbetet. Camilla Andreasson (handledare) hjälpte till med mätutrustningen som examensarbetaren hämtade upp i receptionen på Mindpark i Helsingborg.

3.3. Arbetsprocess

Arbetet med examensarbetet har skett i de sex faserna som beskrivs i avsnitt 3.1. Arbetet har gjorts i en sekventiell, eller som Ian Sommerville kallar det i sin bok *Software Engineering* [16]: ”plan-driven” ordning. Den initiala beskrivningen och informationsinhämtningen har gjorts inkrementellt i två steg, vilket

berodde på att handledaren Jan Behrens på Lindab kom på nya idéer under tiden arbetet pågick. Examensarbetaren hade från början tänkt sig att göra examensarbetet sekventiellt, men fick anpassa arbetet på detta sätt eftersom hon inte kunde få reda på allting som skulle göras vid starten på examensarbetet.

3.4. Verktyg

Verktyg som har använts i examensarbetet är temperatursensorer, som beskrivs i avsnitt 3.7, en tillhörande bluetooth-gateway och programmet Lindab Sensing där värdena från temperatursensorerna sparades (<https://lindabiot.azurewebsites.net/>). Från Lindab Sensing hämtades csv-filer med mätdata. För mätningar av temperatur och koldioxid användes mätare som beskrivs i avsnitt 3.7. Det finns många andra temperatur- och koldioxidsensorer som lika gärna kunde använts: en annan koldioxidsensor som kunde ha använts är till exempel UNI-T A37 och en annan temperatursensor är Shelly H&T Trådlös termometer och hygrometer. Temperatur- och koldioxidsensorerna som användes valdes eftersom Lindab Innovation Hub tillhandhöll dem.

Excel har använts till att rita upp mätvärden i grafform och dessa grafer finns i resultat (kapitel 4). På de ställen där det är språng i graferna har Excel automatiskt gjort en liten utjämning av graferna.

3.5. Mätningar i rummet med en dörr som kan stängas

Alla mätningar som redovisas i resultatet, kapitel 4, utfördes i ett rum inuti en lägenhet byggd på 1940-talet. Rummets mått är höjd 2,7 m, bredd 3,0 m och längd 3,5 m, vilket ger volymen 28 m^3 . Rummet har ett fönster och en dörr in till resten av lägenheten. Alla mätningarna gjordes på eftermiddag eller kväll då solen inte sken in genom fönstret för att inte strålningen från solen skulle värma upp rummet.

Lägenheten har frånluftsventilation. I rummet består ventilationen av två tilluftsventiler: en i fönstret och en rund i väggen. Två mekaniska frånluftsventiler finns i angränsande rum i lägenheten (kök och badrum). Trots stängd dörr till rummet sker en viss genomströmning av luft i rummet genom kanterna runt dörren.

Rummet har också ett vattenburet element som var avstängt under tiden när mätningarna utfördes. Ett annat element som beskrivs i avsnitt 3.7.2 användes istället för detta till stegsvarsmätningarna eftersom det gick att bestämma effekten på det elementet som användes.

I figur 3 är temperatursensorernas, koldioxidsensorns och elementets placering i rummet markerad. Temperatursensorerna kallas T0, T1, T2, T3 och T4 och koldioxidsensorn kallas för C1 och C2 (den placerades om inför den andra mätningen och därför har den två olika namn).

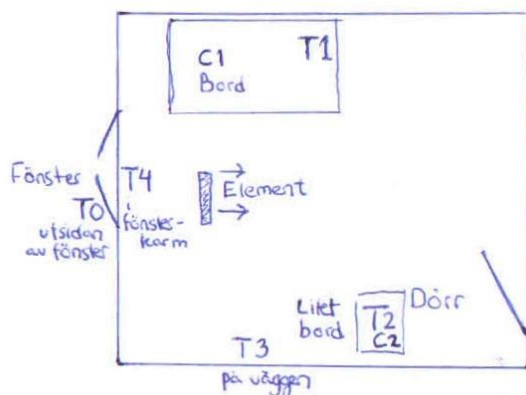


Fig. 3. Skiss över elementets och temperatursensorernas placering i rummet.

3.6. Mätutrustning

I detta kapitel beskrivs temperatursensorerna, elementet och koldioxidsensorn som användes vid mätningarna.

3.6.1. Temperatursensorerna

Temperatursensorerna som användes för att mäta temperaturen i rummet hade samplingsfrekvensen 0,0083 Hz, det vill säga att de mätte temperaturen varannan minut. Temperatursensorerna hade värdesiffror med en decimal.

De värden som sparas för temperaturen vid en viss samplingspunkt från en sensor är minimum, maximum och medelvärde under tiden från den förra samplingspunkten. Eftersom det var ingen eller högst 0,1 graders skillnad mellan dessa 3 värden på alla mätningar, redovisas bara medelvärdena för temperaturerna i resultatet.

3.6.2. Elementet

Elementet var ett så kallat konvektorelement från Clas Ohlson. Elementet tar in luft på undersidan och när luften värmts upp stiger den ut genom gallret i toppen av elementet.

3.6.3. Koldioxidsensorn

Koldioxidsensorn som användes hette AirVisual Pro och är tillverkad av IQAir. Det finns tillhörande mobilapp där man kunde se mätdatan i realtid men problemet var att det inte gick att spara historisk data och att värdena i appen uppdaterades för långsamt jämfört med på sensorns skärm. Därför avläste examensarbetaren värdena på skärmen under experimenten, och skrev in värdena för koldioxidnivå i en Excel-fil. Dessa avläsningar gjordes med intervall på först 2 minuter och senare under det andra experimentet 5 minuter (se vidare avsnitt 3.8).

3.7. Stegsvvar med element

Fasen mätningar stegsvvar bestod av att mäta upp stegsvaret för temperaturen i rummet från när elementet startades. Insignalen till

systemet, kallad P , var elementets effekt, och effekten kunde anta tre olika möjliga alternativ: 750, 1250 eller 2000 W. Stegfunktionen mättes från det att elementet startades på var och en av dessa effekter. Det antogs att temperaturen inne i rummet när elementet inte var påslaget var konstant på eftermiddagen och kvällen. Temperaturen mättes på fyra olika ställen i rummet.

Mätvärdena sparades ner från Lindab Sensing i csv-filer på examensarbetarens dator. Csv-filerna öppnades i Excel där examensarbetaren använde värdena till att rita upp grafer med temperatur på y-axeln och tid på x-axeln, för att det skulle bli tydligare.

En enkel modell användes genom att anta att systemet kunde beskrivas med en linjär differentialekvation av första ordningen, och att stegsvaret blev en exponentialfunktion, se ekvation (8) nedan. Differentialekvationen av första ordningen valdes eftersom det bedömdes efter diskussioner med handledaren att första ordningens modeller var tillräckligt noggranna. Ifall det var ett rimligt antagande eller inte berörs i kapitel 5.

Exponentialfunktionens koefficienter a , b och c beräknades experimentellt genom insättning av mätvärdena från experimentet.

$$y(t) = a + be^{-ct} \quad (8)$$

En ekvation och en tidskonstant beräknades för varje temperatursensor, eftersom temperaturen var olika på de olika mätplatserna i rummet.

Eftersom temperaturkurvorna inte hann plana ut under tiden som mätningarna utfördes, gick det inte att beräkna tidskonstanten med hjälp av värdet på k_0 . Istället beräknades exponentialfunktionerna med ett ekvationssystem som fås genom insättning av mätvärdena vid tre tidpunkter, och från värdet på c kunde tidskonstanten beräknas.

Tre tidpunkter, t_1 , t_2 och t_3 valde ut och deras motsvarande värde på temperaturen kallas här s_1 , s_2 och s_3 . Uträkningen ställdes upp på följande sätt:

$$\begin{cases} a + be^{-ct_1} = s_1 \\ a + be^{-ct_2} = s_2 \\ a + be^{-ct_3} = s_3 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a + be^{-ct_1} = s_1 \\ a + be^{-ct_2} - a - be^{-ct_1} = s_2 - s_1 \\ a + be^{-ct_3} - a - be^{-ct_1} = s_3 - s_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a + be^{-ct_1} = s_1 & (1) \\ b(e^{-ct_2} - e^{-ct_1}) = s_2 - s_1 & (2) \\ b(e^{-ct_3} - e^{-ct_1}) = s_3 - s_1 & (3) \end{cases}$$

$$\frac{(3)}{(2)} \Rightarrow \frac{e^{-ct_3} - e^{-ct_1}}{e^{-ct_2} - e^{-ct_1}} = \frac{s_3 - s_1}{s_2 - s_1}$$

$$\Rightarrow \frac{e^{ct_1}}{e^{ct_1}} \cdot \frac{e^{-ct_3} - e^{-ct_1}}{e^{-ct_2} - e^{-ct_1}} = \frac{s_3 - s_1}{s_2 - s_1}$$

$$\Rightarrow \frac{e^{-c(t_3-t_1)} - 1}{e^{-c(t_2-t_1)} - 1} = \frac{s_3 - s_1}{s_2 - s_1}$$

Följande två variabler infördes:

$$x = e^{-c(t_2-t_1)}$$

$$\alpha = \frac{t_3 - t_1}{t_2 - t_1}$$

$$\Rightarrow \frac{x^\alpha - 1}{x - 1} = \frac{s_3 - s_1}{s_2 - s_1}$$

Ekvationen blir lättast att lösa om man sätter $\alpha = 2$, vilket ger $t_3 - t_1 = 2(t_2 - t_1) = 2h$ med variabeln $h = (t_2 - t_1) = \frac{t_3 - t_1}{2}$.

$$\Rightarrow \frac{s_3 - s_1}{s_2 - s_1} = \frac{x^2 - 1}{x - 1} = \frac{(x - 1)(x + 1)}{x - 1} = x + 1$$

$$\Rightarrow x = \frac{s_3 - s_1}{s_2 - s_1} - 1 = \frac{s_3 - s_1}{s_2 - s_1} - \frac{s_2 - s_1}{s_2 - s_1} = \frac{s_3 - s_2}{s_2 - s_1}$$

Sedan sätts värdet på variabeln x in i ekvationen:

$$x = e^{-c(t_2 - t_1)} = e^{-ch} = \frac{s_3 - s_2}{s_2 - s_1}$$

$$\Rightarrow \ln(e^{-ch}) = \ln\left(\frac{s_3 - s_2}{s_2 - s_1}\right)$$

$$\Rightarrow -ch = \ln\left(\frac{s_3 - s_2}{s_2 - s_1}\right) = \ln(s_3 - s_2) - \ln(s_2 - s_1)$$

$$\Rightarrow c = -\frac{1}{h}\ln(s_3 - s_2) + \frac{1}{h}\ln(s_2 - s_1) = \frac{1}{h}\ln\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_2}$$

Sedan kan tidskonstanten räknas ut med hjälp av c . Den blir:

$$T = \frac{1}{c} = \frac{1}{\frac{1}{h}\ln\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_2}} = h \cdot \frac{1}{\ln\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_2}}$$

Nu kan formler för a och b beräknas:

$$\begin{cases} a + be^{-ct_1} = s_1 \\ a + be^{-ct_2} = s_2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a = s_1 - be^{-ct_1} \\ be^{-ct_2} - be^{-ct_1} = s_2 - s_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a = s_1 - be^{-ct_1} \\ b = \frac{s_2 - s_1}{e^{-ct_2} - e^{-ct_1}} \end{cases}$$

Lösningen implementerades i funktioner i C++, vilka finns redovisade i bilaga 7.2. Funktionerna i C++ användes för att beräkna värdena på a , b , c och T till respektive stegfunktion. De framräknade värdena a , b och c sattes sedan in i formlerna.

3.8. Laststörning med fönster

Rummet som mätningarna utfördes i hade dåliga möjligheter till direkt styrning av ventilationen, så istället användes fönstret som en laststörning i systemet. Den del av fönstret som öppnades hade måtten 137* 55 cm.

Från att fönstret öppnades mättes förändringarna i temperatur och koldioxidnivå. Resultatet användes sedan för att se om det gick att hitta en enkel modell för hur temperatur och koldioxidnivå samverkar.

Två mätomgångar gjordes. Efter den första mätningen flyttades koldioxidmätaren längre in i rummet för att se hur vilken skillnad det blev. De två placeringarna finns utmärkta i figur 3 som C1 och C2 (se kapitel 3.5).

Eftersom det inte gick att spara datan som koldioxidmätaren mätte upp satt examensarbetaren i rummet under experimentet och antecknade värdena för hand. Dessa värden finns i resultatet i kapitel

4.2. Examensarbetaren avger koldioxid i rummet, men detta har inte tagits hänsyn till i resultatet.

Mätvärdena för temperatur importerades till Excel på samma sätt som i avsnitt 3.7, och mätvärdena för koldioxid skevs in i Excel. Examensarbetaren ritade upp grafer: en graf för koldioxid och en för temperatur per experiment.

3.9. Källkritik

Folkhälsomyndigheten, referens [1] och [10], SMHI, referens [3] och Arbetsmiljöverket, referens [17], är svenska myndigheter med experter som arbetar där, och examensarbetaren ansåg sig därför kunna lita på deras hemsidor. Svensk ventilation, referens [2], är en branschorganisation med experter som arbetar med inomhusluft och ventilation, och examensarbetaren ansåg därför att man kan lita på deras bok. Referens [4] och [8] är Lindab Innovation Hubs blogg, och är en tillförlitlig källa. Förlaget Springer International Publishing, som publicerat referens [5], ger ut akademiska tidskrifter och böcker som genomgår peer review innan publicering. Referens [6], [11] och [13] är från tidsskriften Energy and Buildings som är tidning för ny forskning om energianvändning i byggnader, där artiklarna genomgår per review. Referens [7] är från tidsskriften International Journal of Environmental Science and Technology, och deras artiklar kontrolleras av experter. Referens [12] är publicerad av IEEE och de granskar sina artiklar. Referens [14] är skriven av en lärare i Styr- och reglerteknik på universitetet, och det litar examensarbetaren på. Referens [15] och [18] kommer från Nationalencyklopedins hemsida, ett uppslagsverk skrivet av experter. Referens [16] och [19] är läroböcker skrivna av experter.

4. Resultat

I detta kapitel presenteras resultatet av mätningarna som utfördes under examensarbetet. Först presenteras resultaten för stegsvar med konvektorelement (enbart temperatur) och sedan för laststörning med fönster (både temperatur och koldioxidnivå).

4.1. Stegsvaret med konvektorelement

Experimentet utfördes i enlighet med beskrivningen i kapitel 3.7, med stegsvar för temperaturen i rummet för olika effekt på elementet, 750 W, 1250 W och 2000 W. Värdena redovisas i tabellform samt i grafform, för en bättre läsbarhet och förståelse.

4.1.1. Stegsvaret med elementet på 750 W

Stegsvaret för experimentet med konvektorelementet på 750 W redovisas i tabell I och i figur 4. Experimentet börjar vid tiden t_0 och tiden mäts i minuter från denna tidpunkt. Sensorerna som kallas T1, T2, T3 och T4 är utplacerade i rummet. Där det är streck har inget värde sparats av sensorn, vilket kan ha berott på misslyckad överföring från sensorerna till bluetooth-gatewayen. Utomhustemperaturen under tiden för experimentet fluktuerade omkring 5°C.

Skillnaden mellan den högsta och den lägsta temperaturen vid mätpunkterna var 1,8°C vid mätningens början och 1,5°C vid mätningens slut (efter 138 minuter). Examensarbetaren hade planerat att alla experimenten skulle pågå minst 2 timmar, men tidmätningen gjordes inte exakt. Detta experimentet pågick under 138 minuter.

För sensor T1 ökade temperaturen linjärt och för sensor T2 ökade den nästan linjärt, men för sensor T3 och sensor T4 ökade

temperaturen snabbt i början och långsammare sedan. Inget jämviktsläge för temperaturen uppnåddes under experimentet.

TABELL I. TEMPERATUR MED 750 W ELEMENT

Tid (minuter)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
t_0	22.5	21.9	22	20.7
$t_0 + 2$	22.5	21.9	22	20.7
$t_0 + 4$	22.5	21.9	22	20.7
$t_0 + 6$	22.5	21.9	22.15	20.85
$t_0 + 8$	22.5	21.9	22.3	21
$t_0 + 10$	22.5	22	22.4	21.1
$t_0 + 12$	22.5	22	22.4	21.1
$t_0 + 14$	22.5	22	22.5	21.2
$t_0 + 16$	22.6	22	22.6	21.3
$t_0 + 18$	22.6	22	22.6	21.3
$t_0 + 20$	22.6	22.1	22.7	21.3
$t_0 + 22$	22.6	22.1	22.7	21.4
$t_0 + 24$	22.6	22.1	22.7	21.4
$t_0 + 26$	22.6	22.1	22.7	21.4
$t_0 + 28$	22.6	22.2	22.8	21.4
$t_0 + 30$	22.6	22.2	22.8	21.5
$t_0 + 32$	22.7	22.2	22.9	21.5
$t_0 + 34$	22.7	22.2	22.9	21.5
$t_0 + 36$	22.7	22.2	22.9	21.5
$t_0 + 38$	22.7	22.3	22.9	21.6
$t_0 + 40$	22.7	22.3	23	21.6
$t_0 + 42$	22.7	22.3	23	21.6

$t_0 + 44$	22.75	22.3	23	21.6
$t_0 + 46$	22.8	22.3	23	21.6
$t_0 + 48$	22.8	22.4	23.1	21.6
$t_0 + 50$	22.8	22.4	23.1	21.7
$t_0 + 52$	22.8	22.4	23.1	21.7
$t_0 + 54$	22.8	22.4	23.1	21.7
$t_0 + 56$	22.8	22.4	23.1	21.7
$t_0 + 58$	22.8	22.4	23.2	21.7
$t_0 + 60$	22.8	22.4	23.2	21.7
$t_0 + 62$	22.8	22.5	23.2	21.7
$t_0 + 64$	22.8	22.5	23.2	21.8
$t_0 + 66$	22.9	22.5	23.2	21.8
$t_0 + 68$	22.9	22.5	23.2	21.8
$t_0 + 70$	22.9	22.5	23.3	21.8
$t_0 + 72$	22.9	22.5	23.3	21.8
$t_0 + 74$	22.9	22.5	23.3	21.8
$t_0 + 76$	22.9	22.5	23.3	21.8
$t_0 + 78$	22.9	22.6	23.3	21.8
$t_0 + 80$	22.9	22.6	23.3	21.9
$t_0 + 82$	22.9	22.6	23.3	21.9
$t_0 + 84$	22.9	22.6	23.3	21.9
$t_0 + 86$	22.9	22.6	23.4	21.9
$t_0 + 88$	-	-	-	-
$t_0 + 90$	-	-	-	-
$t_0 + 92$	-	-	-	-
$t_0 + 94$	-	-	-	-
$t_0 + 96$	-	-	-	-

$t_0 + 98$	23	22.7	23.4	21.9
$t_0 + 100$	23	22.7	23.4	22
$t_0 + 102$	23	22.7	23.5	22
$t_0 + 104$	23	22.7	23.5	22
$t_0 + 106$	23	22.7	23.5	22
$t_0 + 108$	23	22.8	23.5	22
$t_0 + 110$	23	22.7	23.5	22
$t_0 + 112$	23	22.8	23.5	22
$t_0 + 114$	23	22.8	23.5	22
$t_0 + 116$	23.1	22.8	23.5	22
$t_0 + 118$	23.1	22.8	23.5	22
$t_0 + 120$	23.1	22.8	23.5	22.1
$t_0 + 122$	23.1	22.8	23.6	22.1
$t_0 + 124$	23.1	22.8	23.5	22.1
$t_0 + 126$	23.1	22.8	23.5	22.1
$t_0 + 128$	23.1	22.8	23.6	22.1
$t_0 + 130$	23.1	22.9	23.6	22.1
$t_0 + 132$	23.1	22.9	23.6	-
$t_0 + 134$	23.1	22.9	23.6	-
$t_0 + 136$	23.1	22.9	23.6	22.1
$t_0 + 138$	23.15	22.9	23.6	22.1

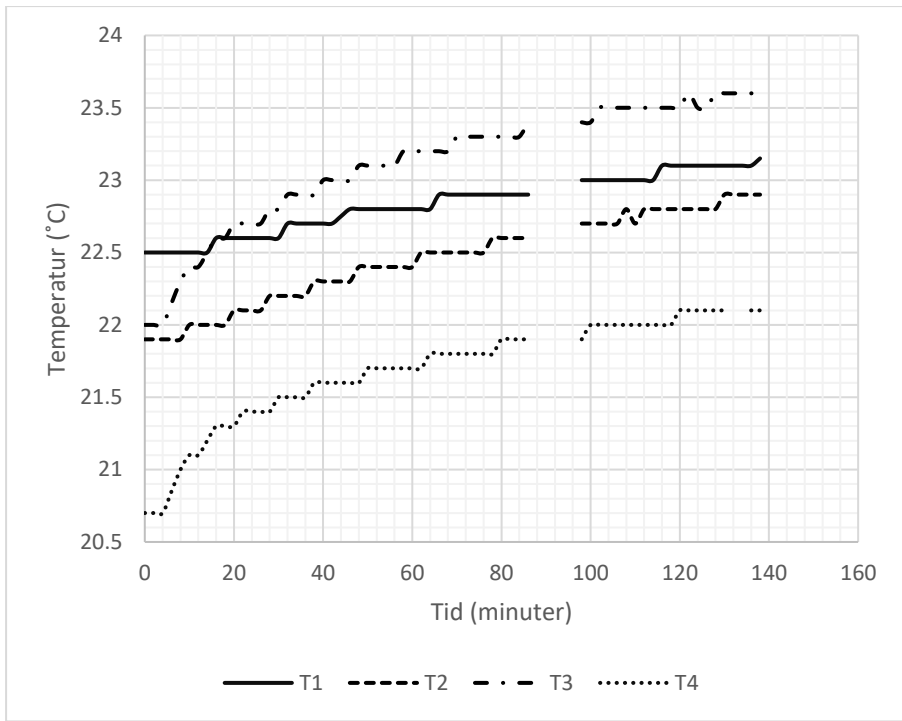


Fig. 4. Temperatur för 750 W element.

För sensor T1 fungerar inte exponentialfunktionen eftersom T1 följer en linjär kurva. Även sensor T2 är nästan linjär, men ändå gjordes beräkning av a , b och c med ekvation (8) i kapitel 3.8 med värdena $h = 60$, $t_1 = 0$, $t_2 = 60$ och $t_3 = 120$. Ekvationen för sensor T2 blev lika med ekvation (9) och tidskonstanten blev 269 minuter.

Sensorerna T3 och T4 liknar mer exponentialkurvor. Samma värden på h , t_1 , t_2 och t_3 som för T2 användes för beräkningen av ekvationer och tidskonstanter för T3 och T4. Ekvation (10) gällde för sensor T3 och tidskonstanten var 43,3 minuter. Ekvation (11) gällde för sensor T4 och tidskonstanten var 65,5 minuter.

Koefficienterna i exponenterna avrundades till 4 decimalers noggrannhet, för att det inte skulle bli orimligt noggrant.

$$y_1(t) = 24.40 - 2.5e^{-0.0037t} \quad (9)$$

$$y_2(t) = 23.60 - 1.6e^{-0.0231t} \quad (10)$$

$$y_3(t) = 22.37 - 1.67e^{-0.0153t} \quad (11)$$

För att se hur väl ekvationerna stämde ritades de upp tillsammans med mätvärdena för respektive sensor. Sensor T2 jämförs i figur 5, sensor T3 i figur 6 och sensor T4 i figur 7.

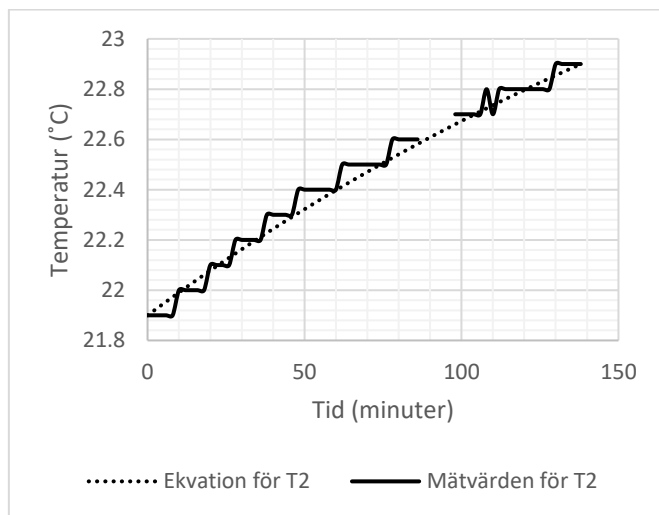


Fig. 5. Jämförelse mellan ekvation (9) och mätvärden för sensor T2 med elementet på 750 W.

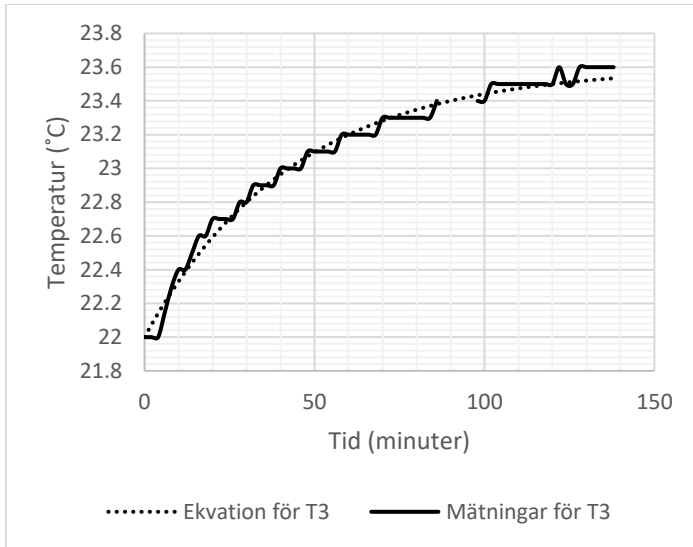


Fig. 6. Jämförelse mellan ekvation (10) och mätvärden för sensor T3 med elementet på 750 W.

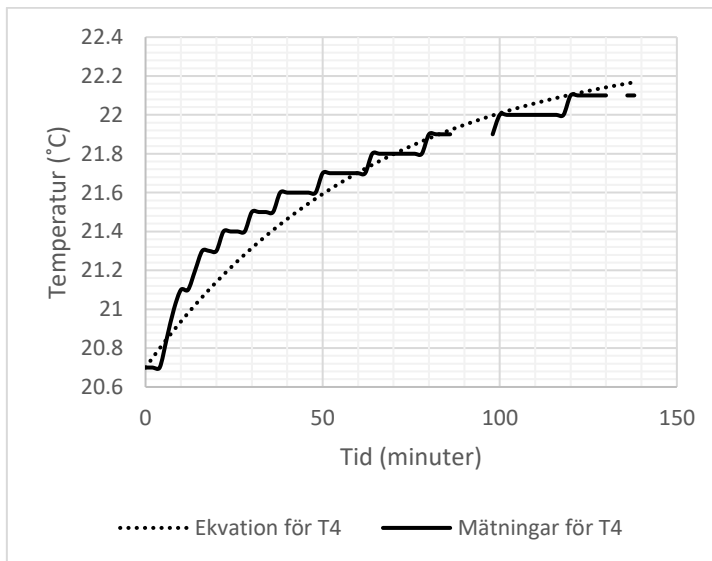


Fig. 7. Jämförelse mellan ekvation (11) och mätvärden för sensor T4 med elementet på 750 W.

4.1.2. Stegsvär med elementet på 1250 W

Stegsväret för experimentet med konvektorelementet på 1250 W redovisas i tabell II och i figur 8. Experimentet börjar vid tiden t_0 och tiden mäts i minuter från denna tidpunkt. Sensorerna som kallas T1, T2, T3 och T4 är utplacerade i rummet på samma sätt som för 750 W. Där det är streck har inget värde sparats för sensorn, vilket tros ha berott på misslyckad överföring från sensorerna till bluetooth-gatewayen. Utomhustemperaturen under tiden för experimentet fluktuerade omkring 7°C (experimentet utfördes en annan dag än det för 750 W).

Skillnaden mellan den högsta och den lägsta temperaturen vid mätpunkterna var $2,9^\circ\text{C}$ vid mätningens början och $2,5^\circ\text{C}$ vid mätningens slut (efter 158 minuter). Skillnaden från förra mätningen kan till exempel bero på vindstyrka och vindriktning utomhus, men detta mättes inte upp. Examensarbetaren hade planerat att alla experimenten skulle pågå minst 2 timmar, men tidmätningen gjordes inte exakt. Detta experimentet pågick under 158 minuter.

För alla sensorerna ökade temperaturen snabbt i början och långsammare sedan, men sensor T1 och sensor T2 var mer linjära än T3 och T4. Inget jämviktsläge för temperaturen uppnåddes under experimentet.

TABELL II. TEMPERATUR MED 1250 W ELEMENT

Tid (minuter)	T1 ($^\circ\text{C}$)	T2 ($^\circ\text{C}$)	T3 ($^\circ\text{C}$)	T4 ($^\circ\text{C}$)
t_0	21.9	21.3	21.5	19
$t_0 + 2$	21.9	21.3	21.5	19
$t_0 + 4$	21.9	21.3	21.8	19.1
$t_0 + 6$	21.9	21.3	21.8	19.3
$t_0 + 8$	21.9	21.4	22	19.5
$t_0 + 10$	22	21.4	22.2	19.7
$t_0 + 12$	22	21.5	22.3	19.8
$t_0 + 14$	22	21.5	22.4	19.9

$t_0 + 16$	22.05	21.6	22.55	20.1
$t_0 + 18$	22.1	21.6	22.7	20.2
$t_0 + 20$	22.1	21.7	22.8	20.2
$t_0 + 22$	22.2	21.7	22.8	20.3
$t_0 + 24$	22.2	21.8	22.9	20.4
$t_0 + 26$	22.2	21.8	22.9	20.4
$t_0 + 28$	22.3	21.8	23	20.4
$t_0 + 30$	22.3	21.9	23.1	20.5
$t_0 + 32$	22.4	21.9	23.1	20.6
$t_0 + 34$	22.4	21.9	23.1	20.6
$t_0 + 36$	22.4	22	23.2	20.6
$t_0 + 38$	22.4	22	23.2	20.7
$t_0 + 40$	22.5	22	23.3	20.7
$t_0 + 42$	22.5	22.1	23.3	20.8
$t_0 + 44$	22.5	22.1	23.3	20.8
$t_0 + 46$	22.6	22.1	23.4	-
$t_0 + 48$	22.6	22.2	23.4	20.9
$t_0 + 50$	22.6	22.2	23.4	-
$t_0 + 52$	-	-	-	-
$t_0 + 54$	22.7	22.3	23.5	21
$t_0 + 56$	22.7	22.3	23.6	21
$t_0 + 58$	22.7	22.3	23.6	21
$t_0 + 60$	22.8	22.4	23.6	21.1
$t_0 + 62$	22.8	22.4	23.6	21.1
$t_0 + 64$	22.8	22.4	23.6	21.1
$t_0 + 66$	22.9	22.4	23.7	21.2
$t_0 + 68$	22.9	22.4	23.7	21.2

$t_0 + 70$	22.9	22.5	23.7	21.2
$t_0 + 72$	22.9	22.5	23.7	21.2
$t_0 + 74$	22.9	22.5	23.8	21.2
$t_0 + 76$	23	22.5	23.8	21.3
$t_0 + 78$	23	22.6	23.8	21.3
$t_0 + 80$	23	22.6	23.9	21.3
$t_0 + 82$	23	22.6	23.8	21.4
$t_0 + 84$	23	22.6	23.9	21.4
$t_0 + 86$	23.1	22.7	23.9	21.4
$t_0 + 88$	23.1	22.7	23.9	21.4
$t_0 + 90$	23.1	22.7	23.9	21.4
$t_0 + 92$	23.1	22.7	24	-
$t_0 + 94$	23.2	22.8	24	21.5
$t_0 + 96$	23.2	22.8	24	21.5
$t_0 + 98$	23.2	22.8	24.1	21.6
$t_0 + 100$	23.2	22.8	24.1	21.6
$t_0 + 102$	23.2	22.8	24.1	21.6
$t_0 + 104$	23.3	22.8	24.1	21.6
$t_0 + 106$	23.3	22.9	24.1	21.6
$t_0 + 108$	23.3	22.9	24.2	21.7
$t_0 + 110$	23.3	22.9	24.1	21.7
$t_0 + 112$	23.3	22.9	24.2	21.7
$t_0 + 114$	23.4	23	24.2	21.7
$t_0 + 116$	23.4	23	24.2	21.7
$t_0 + 118$	23.4	23	24.2	21.7
$t_0 + 120$	23.4	23	24.3	21.8
$t_0 + 122$	23.45	23.05	24.3	21.8

$t_0 + 124$	23.5	23.1	24.3	21.8
$t_0 + 126$	23.5	23.1	24.3	21.8
$t_0 + 128$	23.5	23.1	24.3	21.8
$t_0 + 130$	23.5	23.1	24.3	21.9
$t_0 + 132$	23.5	23.1	24.4	21.8
$t_0 + 134$	23.5	23.2	24.4	21.9
$t_0 + 136$	23.6	23.1	24.4	21.9
$t_0 + 138$	23.6	23.2	24.4	21.9
$t_0 + 140$	23.6	23.2	24.4	21.9
$t_0 + 142$	23.6	23.2	24.5	22
$t_0 + 144$	-	-	-	-
$t_0 + 146$	23.7	23.3	24.5	22
$t_0 + 148$	23.7	23.3	24.5	22
$t_0 + 150$	23.7	23.3	24.5	22
$t_0 + 152$	23.7	23.3	24.5	22
$t_0 + 154$	23.7	23.3	24.5	22.1
$t_0 + 156$	23.7	23.3	24.6	22.1
$t_0 + 158$	23.8	23.35	24.6	22.1

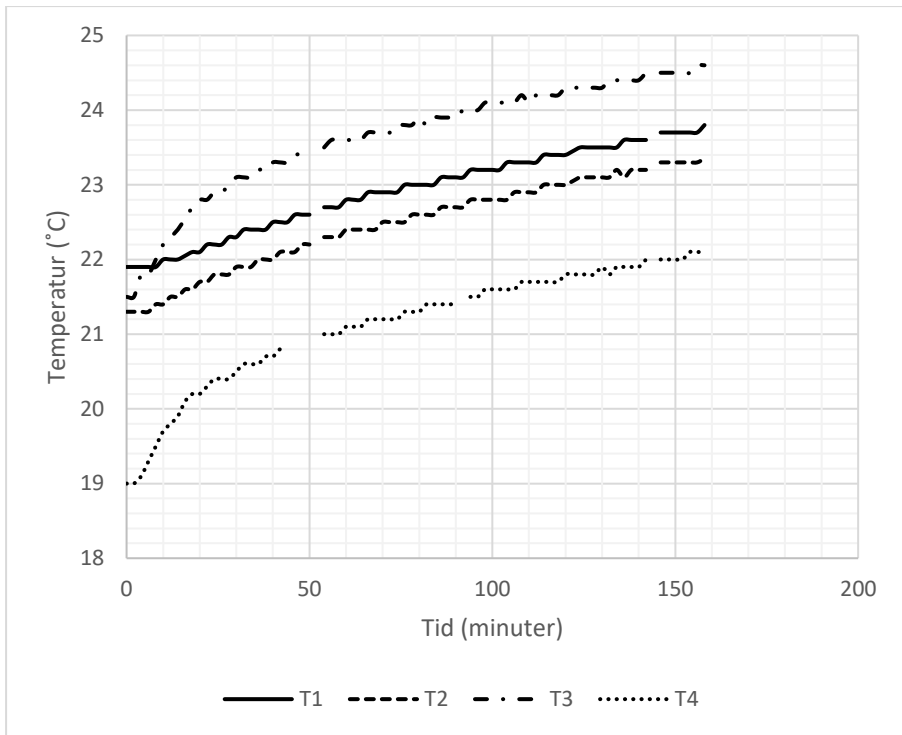


Fig. 8. Temperatur för 1250 W element.

Efter beräkning av a , b och c i ekvation (8) i kapitel 3.8 med värdena $h = 60$, $t_1 = 0$, $t_2 = 60$ och $t_3 = 120$, blir ekvationen för sensor T1 lika med ekvation (12), för sensor T2 lika med ekvation (13), för sensor T3 lika med ekvation (14) och för sensor T4 lika med ekvation (15). Koefficienterna i exponenterna avrundades till 4 decimalers noggrannhet, för att det inte skulle bli orimligt noggrant. Sensor T3 och sensor T4 hade samma ekvation förutom att T4 var lägre ner.

$$y_4(t) = 24.6 - 2.7e^{-0.0068t} \quad (12)$$

$$y_5(t) = 23.72 - 2.42e^{-0.0101t} \quad (13)$$

$$y_6(t) = 24.65 - 3.15e^{-0.0183t} \quad (14)$$

$$y_7(t) = 22.15 - 3.15e^{-0.0183t} \quad (15)$$

Vidare fås tidskonstanterna med ekvation (7) från kapitel 2.3 med värdena för c i respektive ekvation till 148 minuter för sensor T1, 100 minuter för sensor T2, 54,6 minuter för sensor T3 och 54,6 minuter för sensor T4.

För att se hur väl ekvationerna stämde ritades de upp tillsammans med mätvärdena för respektive sensor. Sensor T1 jämförs i figur 9, sensor T2 i figur 10, sensor T3 i figur 11 och sensor T4 i figur 12.

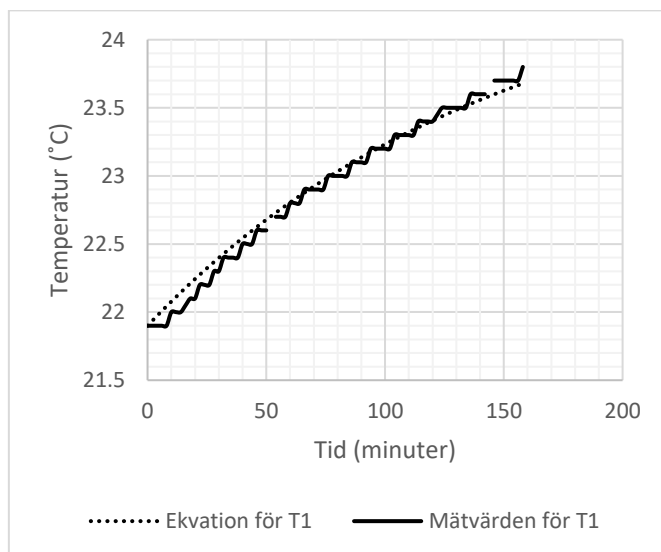


Fig. 9. Jämförelse mellan ekvation (12) och mätvärden för sensor T1 med elementet på 1250 W.

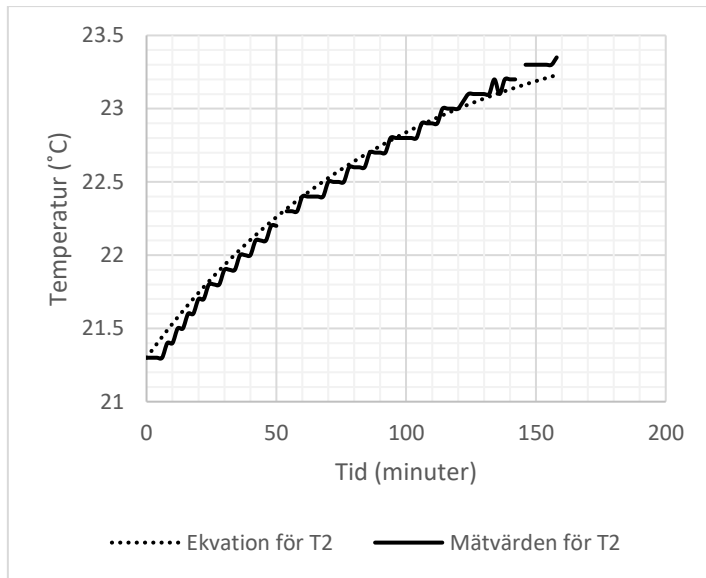


Fig. 10. Jämförelse mellan ekvation (13) och mätvärden för sensor T2 med elementet på 1250 W.

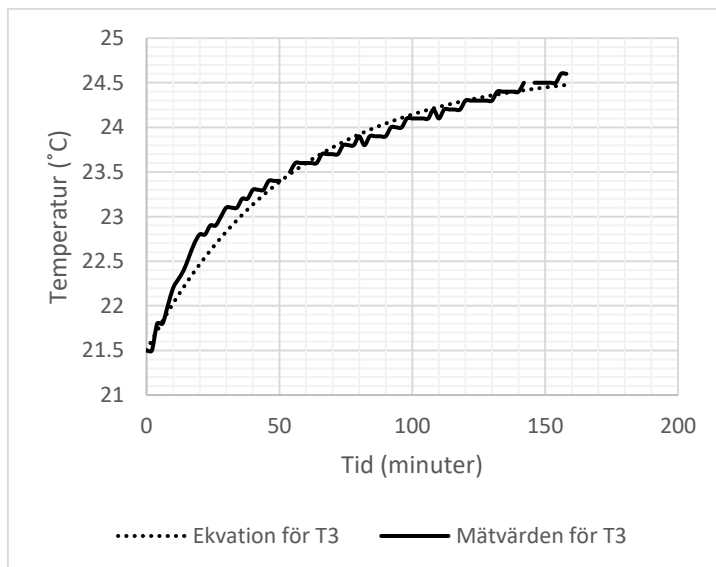


Fig. 11. Jämförelse mellan ekvation (14) och mätvärden för sensor T3 med elementet på 1250 W.

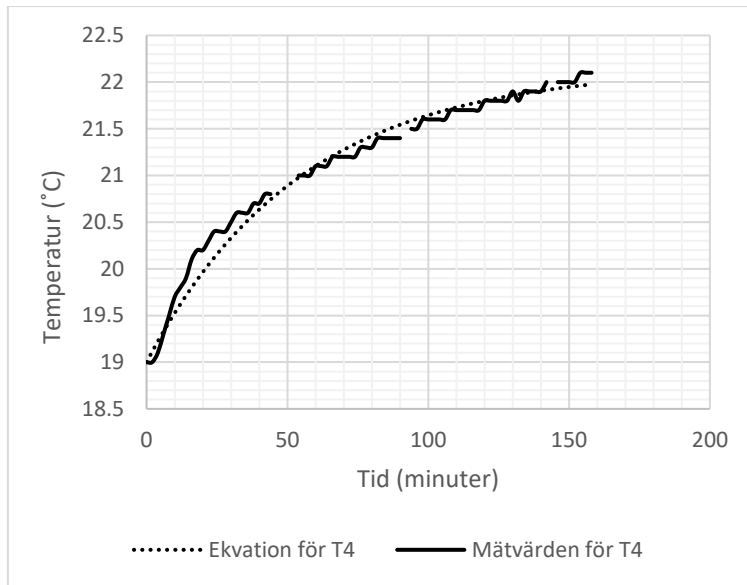


Fig. 12. Jämförelse mellan ekvation (15) och mätvärden för sensor T4 med elementet på 1250 W.

4.1.3. Stegsvvar med elementet på 2000 W

Stegsvaret för experimentet med konvektorelementet på 2000 W redovisas i tabell III och i figur 13. Experimentet börjar vid tiden t_0 och tiden mäts i minuter från denna tidpunkt. Sensorerna som kallas T1, T2, T3 och T4 är utplacerade i rummet på samma sätt som tidigare. Där det är streck har inget värde sparats för sensorn, vilket tros ha berott på misslyckad överföring från sensorerna till bluetooth-gatewayen. Utomhustemperaturen under tiden för experimentet fluktuerade omkring 9°C.

Skillnaden mellan den högsta och den lägsta temperaturen vid mätpunkterna var 2,8°C vid mätningens början och 2,0°C vid mätningens slut (efter 146 minuter). Examensarbetaren hade planerat att alla experimenten skulle pågå minst 2 timmar, men tidmätningen gjordes inte exakt. Detta experimentet pågick under 146 minuter.

För alla sensorerna ökade temperaturen snabbt i början och långsammare sedan, men sensor T1 och sensor T2 var mer linjära än T3 och T4. Inget jämviktsläge för temperaturen uppnåddes under experimentet.

TABELL III. TEMPERATUR MED 2000 W ELEMENT

Tid (minuter)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
t_0	23.1	22.1	22.3	20.3
$t_0 + 2$	23.1	22.1	22.3	20.3
$t_0 + 4$	23.1	22.1	22.3	20.3
$t_0 + 6$	23.1	22.1	22.5	20.4
$t_0 + 8$	23.25	22.15	23.05	21.1
$t_0 + 10$	23.3	22.3	23.5	21.5
$t_0 + 12$	23.4	22.3	23.7	21.6
$t_0 + 14$	-	-	-	-
$t_0 + 16$	23.5	22.5	24.1	21.9
$t_0 + 18$	23.6	22.6	24.2	22.2
$t_0 + 20$	23.6	22.7	24.3	22.2
$t_0 + 22$	23.7	22.7	24.5	22.4
$t_0 + 24$	23.8	22.8	24.6	22.5
$t_0 + 26$	23.9	22.9	24.8	22.6
$t_0 + 28$	23.9	22.9	24.9	22.6
$t_0 + 30$	24	23	24.9	22.7
$t_0 + 32$	24	23.1	25	22.8
$t_0 + 34$	24.1	23.1	25.1	22.9
$t_0 + 36$	24.2	23.2	25.2	22.9
$t_0 + 38$	24.2	23.3	25.2	23.1
$t_0 + 40$	24.3	23.3	25.3	23.1

$t_0 + 42$	24.4	23.4	25.4	23.2
$t_0 + 44$	24.4	23.5	25.5	23.3
$t_0 + 46$	24.5	23.5	25.55	23.35
$t_0 + 48$	24.6	23.6	25.7	23.4
$t_0 + 50$	24.6	23.6	25.7	23.5
$t_0 + 52$	24.7	23.7	25.8	23.6
$t_0 + 54$	24.7	23.8	25.8	23.6
$t_0 + 56$	24.8	23.8	25.9	23.7
$t_0 + 58$	24.8	23.8	26	23.8
$t_0 + 60$	24.9	23.9	26	23.8
$t_0 + 62$	24.9	24	26.1	23.8
$t_0 + 64$	25	24	26.1	23.9
$t_0 + 66$	25	24	26.2	24
$t_0 + 68$	25.1	24.1	26.2	24
$t_0 + 70$	25.1	24.1	26.2	24.1
$t_0 + 72$	25.1	24.2	26.3	24.1
$t_0 + 74$	25.2	24.2	26.3	24.2
$t_0 + 76$	25.2	24.3	26.4	24.3
$t_0 + 78$	25.2	24.3	26.4	24.3
$t_0 + 80$	25.3	24.3	26.5	24.4
$t_0 + 82$	25.35	24.4	26.55	24.4
$t_0 + 84$	25.4	24.4	26.6	24.5
$t_0 + 86$	25.4	24.5	26.6	24.5
$t_0 + 88$	25.5	24.5	26.6	24.6
$t_0 + 90$	25.5	24.6	26.7	24.6
$t_0 + 92$	25.6	24.6	26.7	24.7
$t_0 + 94$	25.6	24.7	26.8	24.7

$t_0 + 96$	25.6	24.7	26.8	24.7
$t_0 + 98$	25.7	24.7	26.8	24.8
$t_0 + 100$	25.7	24.8	26.9	24.8
$t_0 + 102$	25.7	24.8	26.9	24.9
$t_0 + 104$	25.8	24.9	27	24.9
$t_0 + 106$	25.8	24.9	27	24.9
$t_0 + 108$	25.8	24.9	27	25
$t_0 + 110$	25.9	25	27	25
$t_0 + 112$	25.9	25	27.1	25.1
$t_0 + 114$	26	25.05	27.15	25.1
$t_0 + 116$	26	25.1	27.2	25.1
$t_0 + 118$	26	25.1	27.2	25.2
$t_0 + 120$	-	-	-	-
$t_0 + 122$	26.1	25.2	27.3	25.2
$t_0 + 124$	26.1	25.2	27.3	25.3
$t_0 + 126$	26.2	25.3	27.3	25.3
$t_0 + 128$	26.2	25.3	27.4	25.4
$t_0 + 130$	26.2	25.3	27.4	25.4
$t_0 + 132$	26.3	25.4	27.4	25.4
$t_0 + 134$	26.3	25.4	27.4	25.5
$t_0 + 136$	26.3	25.4	27.5	25.5
$t_0 + 138$	26.3	25.5	27.5	25.5
$t_0 + 140$	26.4	25.5	27.5	25.5
$t_0 + 142$	26.4	25.5	27.6	25.6
$t_0 + 144$	26.4	25.5	27.6	25.6
$t_0 + 146$	26.5	25.6	27.6	25.7

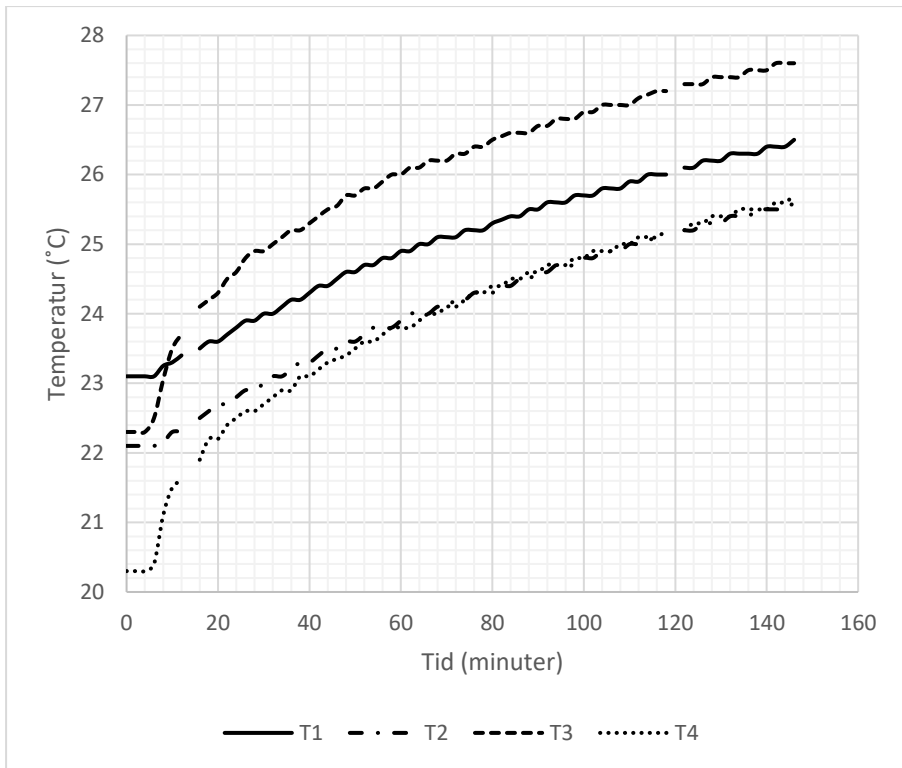


Fig. 13. Temperatur för 2000 W element.

Efter beräkning av a , b och c i ekvation (8) från kapitel 3.8 med värdena $h = 70$, $t_1 = 0$, $t_2 = 70$ och $t_3 = 140$, blir ekvationen för sensor T1 lika med ekvation (16), för sensor T2 lika med ekvation (17), för sensor T3 lika med ekvation (18) och för sensor T4 lika med ekvation (19). Att inte $h = 60$ användes som tidigare berodde på att temperaturvärde saknades vid $t_0 + 120$ i denna mätserie och därför kunde detta inte användas här. Koefficienterna i exponenterna avrundades till 4 decimalers noggrannhet, för att det inte skulle bli orimligt noggrant.

$$y_8(t) = 28.81 - 5.714e^{-0.0062t} \quad (16)$$

$$y_9(t) = 28.77 - 6.67e^{-0.0051t} \quad (17)$$

$$y_{10}(t) = 28.15 - 5.85e^{-0.0157t} \quad (18)$$

$$y_{11}(t) = 26.32 - 6.02e^{-0.0143t} \quad (19)$$

Vidare fås tidskonstanterna med ekvation (7) med värdena för c i respektive ekvation till 162,5 minuter för sensor T1, 196,3 minuter för sensor T2, 63,7 minuter för sensor T3 och 70.1 minuter för sensor T4.

För att se hur väl ekvationerna stämde ritades de upp tillsammans med mätvärdena för respektive sensor. Sensor T1 jämförs i figur 14, sensor T2 i figur 15, sensor T3 i figur 16 och sensor T4 i figur 17.

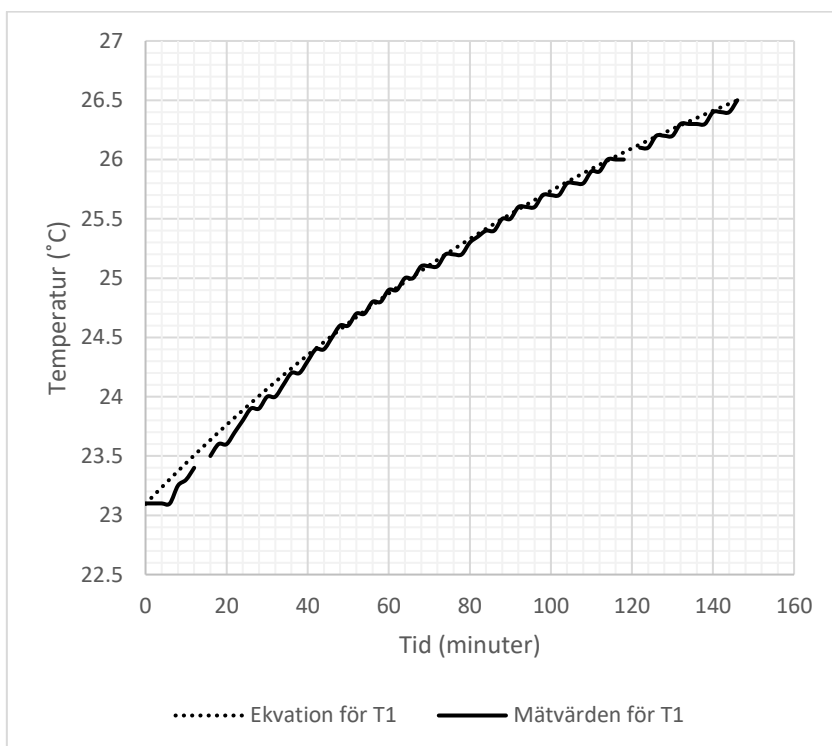


Fig. 14. Jämförelse mellan ekvation (16) och mätvärden för sensor T1 med elementet på 2000 W.

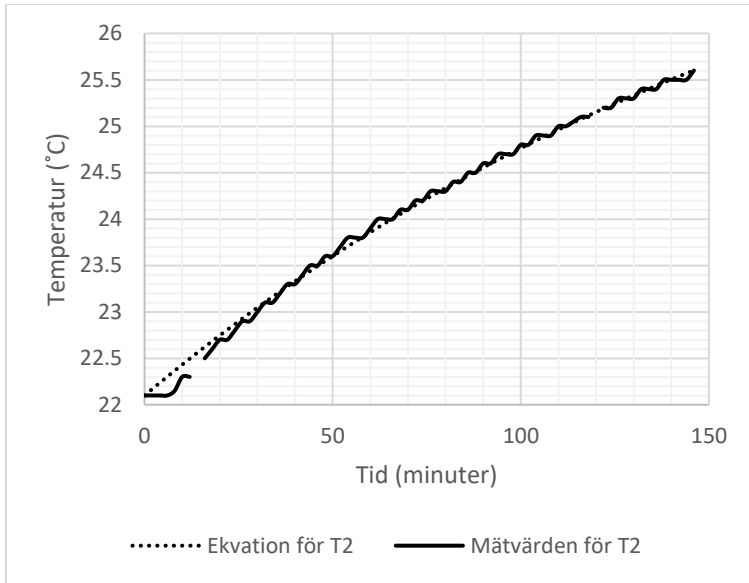


Fig. 15. Jämförelse mellan ekvation (17) och mätvärden för sensor T2 med elementet på 2000 W.

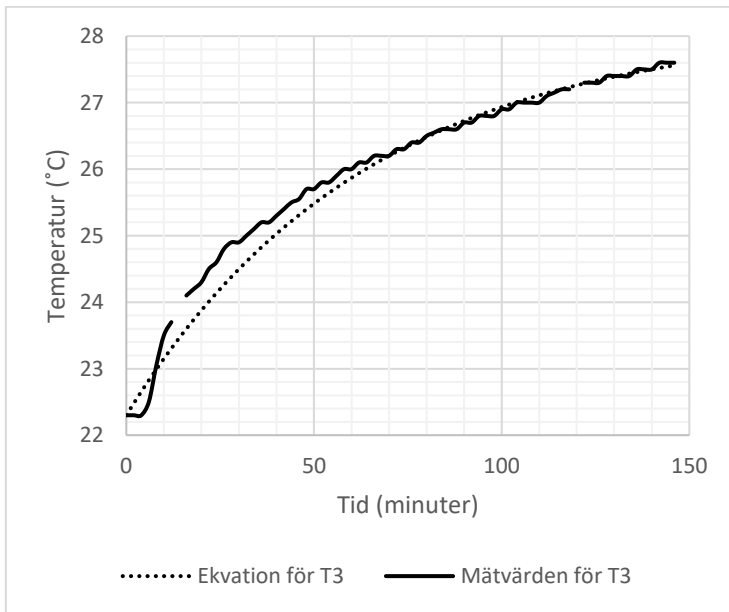


Fig. 16. Jämförelse mellan ekvation (18) och mätvärden för sensor T3 med elementet på 2000 W.

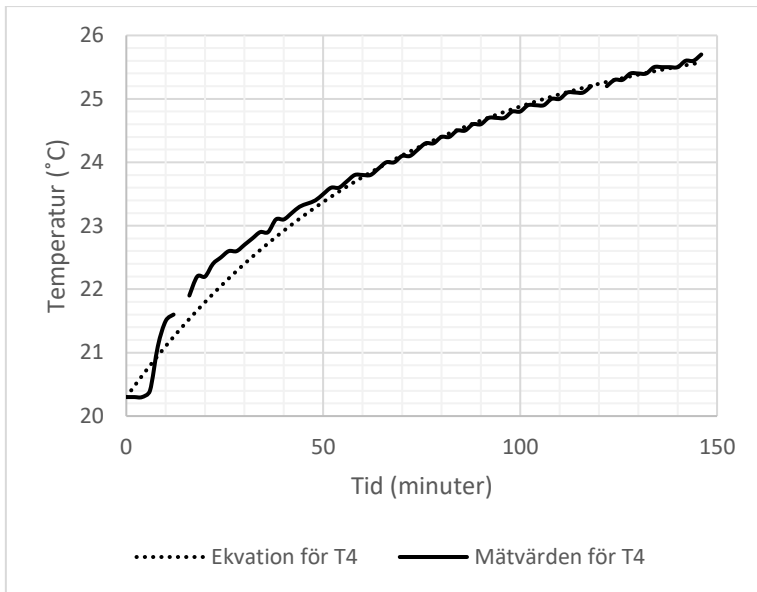


Fig. 17. Jämförelse mellan ekvation (19) och mätvärden för sensor T4 med elementet på 2000 W.

4.2. Laststörning med fönster

En temperatursensor klistrades upp på utsidan av fönstret i rummet under mätningen för att mäta utomhustemperaturen och jämföra den med temperaturen inomhus som beskrivs i kapitel 3.5. Avläsningen av koldioxidmätaren gjordes manuellt genom att examensarbetaren satt i rummet med en klocka och antecknade värdet, såsom har beskrivits i kapitel 3.8.

4.2.1. Laststörning med koldioxidmätaren nära fönstret

Koldioxidmätaren stod nära fönstret. Det blåste uppskattningsvis omkring 10 m/s utomhus. Koldioxidhalten respektive temperaturerna för T1, T2 och T3 redovisas i tabell IV. För ökad läsbarhet är de även ritade i grafform och graferna presenteras i figur 18 och figur 19.

Koldioxid mäts i ppm i luften. T0 är utomhustemperaturen och T1, T2 och T3 är temperatursensorer inuti rummet. Tiden mäts i minuter från experimentets starttid t_0 .

Koldioxidhaltens initialvärde var 705 ppm. Värdet sjunker snabbt i början, planar sedan ut och slutar på 419 ppm. Den snabba förändringshastigheten i början beror troligtvis på att mätaren stod nära fönstret. Slutvärdet är ungefär samma som koldioxidhalten utomhus. Koldioxidnivån i atmosfären är 400 ppm, men eftersom experimentet gjordes i en stad (Helsingborg) är den lite högre, och dessutom andades examensarbetetaren ut koldioxid i rummet. Eftersom koldioxidnivån inte ändrade sig särskilt mycket efter att det pågått en kvart avslutades experimentet tidigare än det i kapitel 4.2.2.

Temperaturen minskar linjärt med omkring en grad under experimentet.

TABELL IV. KOLDIOXIDNIVÅ OCH TEMPERATUR VID LASTSTÖRNING 1.

Tid (minuter)	CO ₂ (ppm)	T0 (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
t_0	705	19,7	24,7	24,6	24,8
$t_0 + 2$	679	19,7	24,7	24,6	24,8
$t_0 + 4$	547	19,6	24,5	24,5	24,7
$t_0 + 6$	460	19,5	24,5	24,4	24,6
$t_0 + 8$	440	19,5	24,3	24,3	24,4
$t_0 + 10$	435	19,5	24,2	24,2	24,4
$t_0 + 12$	434	19,5	24,1	24,2	24,3
$t_0 + 14$	429	19,4	24,1	24,1	24,2
$t_0 + 16$	420	19,25	23,95	24,05	24,15
$t_0 + 18$	416	19,2	23,7	23,9	24,1
$t_0 + 20$	417	19,1	23,7	23,9	24,1
$t_0 + 22$	420	19,0	23,6	23,8	24,0

$t_0 + 24$	419	19,6	23,6	23,8	23,9
------------	-----	------	------	------	------

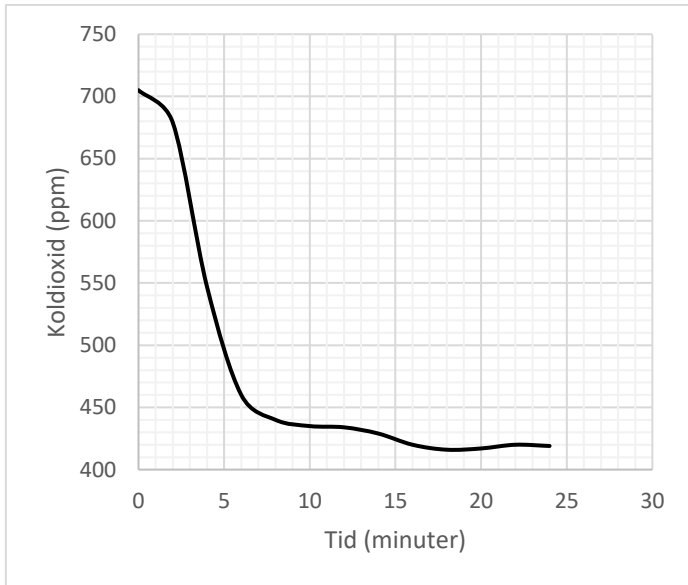


Fig. 18. Koldioxid i rummet från att fönstret öppnas.

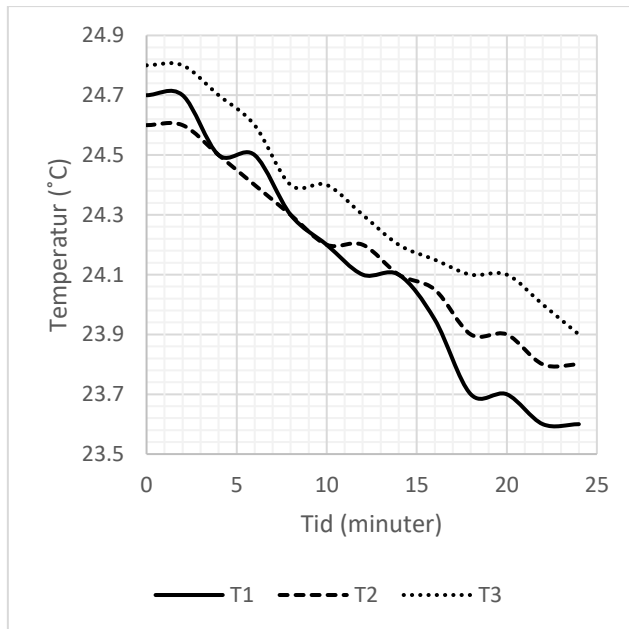


Fig. 19. Temperaturen vid sensorerna T1, T2 och T3 från att fönstret öppnas.

Om man antar att koldioxidnivåkurvan är en exponentialfunktion och beräknar den på samma sätt som för stegsvaret med element (se kapitel 3.7) med värdena $h = 10$, $t_1 = 0$, $t_2 = 10$ och $t_3 = 20$ fås ekvation (20). En jämförelse mellan mätvärdena på koldioxidnivå och ekvationen finns i figur 20. Tidskonstanten till ekvationen blir 3.69 minuter.

$$y_1(t) = 415.7 + 289.3e^{-0.2709t} \quad (20)$$

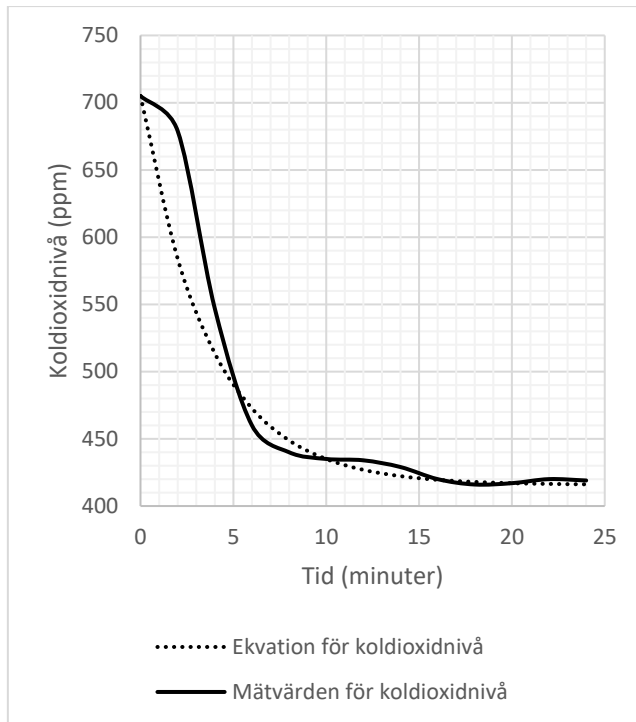


Fig. 20. Jämförelse av koldioxidnivå mellan mätvärden och ekvation (20).

4.2.2. Laststörning med koldioxidmätaren ej nära fönstret

Då den andra mätningen gjordes blåste det uppskattningsvis 1 m/s. Koldioxidmätaren stod cirka 1,7 m längre in i rummet. I tabell V presenteras mätvärdena för koldioxidnivå och temperaturena för T1, T2 och T3. Dessa mätvärden finns också ritade i grafform för ökad läsbarhet. Graferna presenteras i figur 21 och figur 22.

På samma sätt som tidigare är T0 utomhustemperaturen och T1, T2 och T3 temperatursensorerna inuti rummet. Tiden mäts i minuter från experimentets starttid t_0 .

Avläsningarna av koldioxidmätaren gjordes först varannan minut, men sedan var tionde minut eftersom koldioxidhalten minskade långsamt i slutet av testet. Därför är det tomma rutor i tabell V.

Koldioxidnivån började på 808 ppm, gick snabbt nedåt i början och minskade sedan linjärt. Slutvärdet var 497 ppm. Att slutvärdet är högre än i det förra experimentet kan bero på att examensarbetaren satt i rummet och andades och även att inte nivå nått jämvikt riktigt än. Temperaturen minskade linjärt med något mindre än en grad under experimentet.

TABELL V. KOLDIOXIDNIVÅ OCH TEMPERATUR VID LASTSTÖRNING 2.

Tid (minuter)	CO ₂ (ppm)	T0 (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
t ₀	808	18	23.4	23.4	23.6
t ₀ + 2	797	17.9	23.4	23.4	23.6
t ₀ + 4	750	18	23.4	23.4	23.5
t ₀ + 6	678	18.1	23.4	23.3	23.5
t ₀ + 8	627	18.1	23.3	23.3	23.5
t ₀ + 10	606	18.2	23.3	23.2	23.5
t ₀ + 12	590	18.3	23.3	23.2	23.5
t ₀ + 14	591	18.4	23.3	23.2	23.4
t ₀ + 16	575	18.4	23.3	23.2	23.4
t ₀ + 18	561	18.4	23.2	23.2	23.4
t ₀ + 20	557	18.5	23.2	23.2	23.4
t ₀ + 22	558	18.5	23.2	23.1	23.4
t ₀ + 24	552	18.5	23.2	23.1	23.3
t ₀ + 26	542	-	-	-	-
t ₀ + 28	536	18.4	23.1	23.1	23.3
t ₀ + 30	535	18.4	23.1	23.1	23.3
t ₀ + 32	541	18.4	23.1	23.1	23.3
t ₀ + 34	541	18.4	23	23	23.3
t ₀ + 36	534	18.3	23	23	23.3
t ₀ + 38	529	18.3	23	23	23.3
t ₀ + 40	528	18.3	23	23	23.2
t ₀ + 42		18.3	23	23	23.2

$t_0 + 44$		18.3	23	22.9	23.2
$t_0 + 46$		18.3	23	22.9	23.2
$t_0 + 48$		18.2	22.9	22.9	23.2
$t_0 + 50$	513	18.2	22.9	22.9	23.1
$t_0 + 52$		18.1	22.9	22.9	23.1
$t_0 + 54$		18.1	22.8	22.9	23.1
$t_0 + 56$		18	22.8	22.9	23.1
$t_0 + 58$		17.9	22.8	22.8	23.1
$t_0 + 60$	506	17.9	22.8	22.8	23
$t_0 + 62$		17.8	22.7	22.8	23
$t_0 + 64$		17.8	22.7	22.8	23
$t_0 + 66$		17.7	22.7	22.7	23
$t_0 + 68$		17.7	22.7	22.7	23
$t_0 + 70$	497	17.6	22.7	22.7	23
$t_0 + 72$		17.5	22.7	22.7	23
$t_0 + 74$		17.5	22.7	22.7	22.9

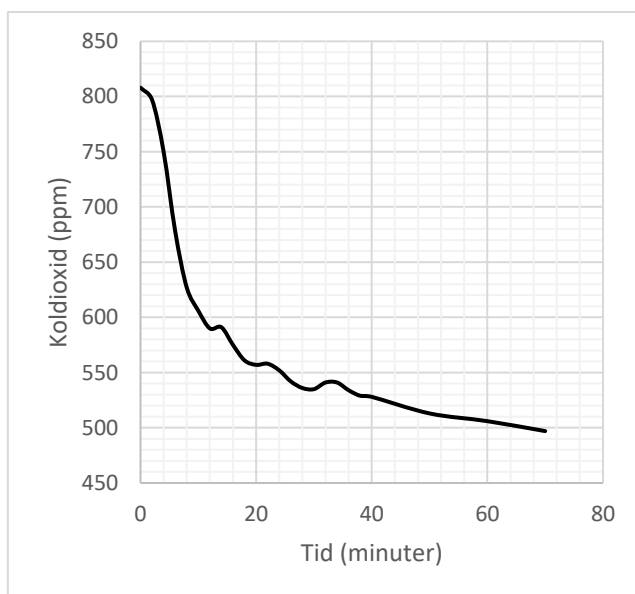


Fig. 21. Koldioxid i rummet från att fönstret öppnas.

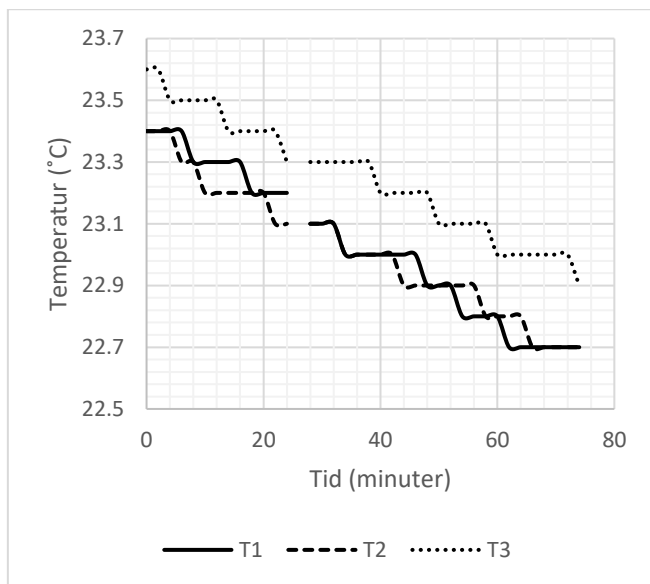


Fig. 22. Temperaturen vid sensorerna T1, T2 och T3 från att fönstret öppnas.

Om man antar att koldioxidnivåkurvan är en exponentialfunktion och beräknar den på samma sätt som för stegsvaret med element (se kapitel 3.7) med värdena $h = 20$, $t_1 = 0$, $t_2 = 20$ och $t_3 = 40$ fås ekvation (21). En jämförelse mellan mätvärdena på koldioxidnivå och ekvationen finns i figur 23. Tidkonstanten är 9,27 minuter.

$$y_1(t) = 524.2 + 283.8e^{-0.1079t} \quad (21)$$

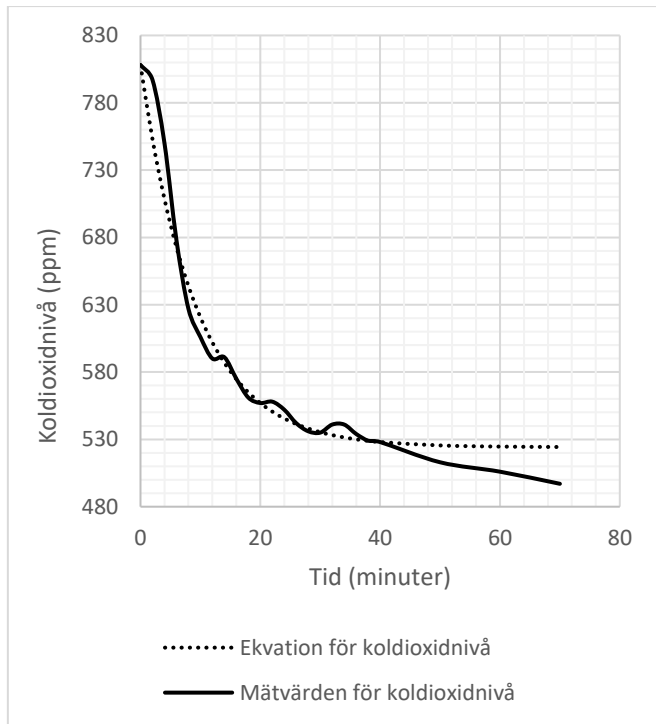


Fig. 23. Jämförelse av koldioxidnivå mellan mätvärden och ekvation (21).

5. Slutsats

I detta kapitel sammanfattas resultaten och problemformuleringarna besvaras.

5.1. Stegsvvar med element

Mätningarna resulterade i en stegsvarsgraf för var och en av de 4 temperatursensorerna till varje effektnivå på elementet. Stegsvaret skiljer sig åt mellan de 4 olika platserna i rummet.

För sensor T1 var stegsvaret linjärt på 750 W och nära linjärt på 1250 och 2000 W, där tidskonstanterna var 148 minuter respektive 162,5 minuter. För alla effekterna som mättes gällde att T1 var den av de 4 stegsvarsgraferna som såg mest linjär ut samt att den hade högst startvärde på temperaturen. De stora värdena på tidskonstanterna för T1 kan bero på att sensorn låg ovanpå ett bord: en trolig orsak är att bordet skärmar av luftflödet i rummet från elementet och därför värms luften upp långsammare där än på andra platser i rummet.

För sensor T2 var tidskonstanterna 269 minuter för 750 W, 100 minuter för 1250 W och 196,3 minuter för 2000 W. De stora tidskonstanterna för T2 kan ha samma orsak som de för T1: T2 låg på ett lite lägre bord. Temperaturen ökade nästan linjärt för sensor T2, vilket syns mest för 750 W eftersom upplösningen var låg. Det kan vara därför som tidskonstanten blev särskilt stor för 750 W.

För sensor T3 ökar temperaturen snabbt i början, snabbare än den beräknade ekvationen. För alla 3 effekterna gick T3 om T1 i temperatur redan efter 10-20 minuter, på grund av att T3 har lägre tidskonstant än T1. Tidskonstanterna var 43,3 minuter för 750 W, 54,6 minuter för 1250 W och 63,7 minuter för 2000 W.

Sensor T4:s stegsvarsgraf liknar mycket den för T3 fast förskjuten nedåt, därför har de mycket lika ekvationer enligt modellen, i synnerhet för 1250 W där de hade precis samma ekvation förutom

värdet på a som var lägre för T4. T4:s tidskonstanter var 65,6 minuter för 750 W, 54,6 minuter för 1250 W och 70,1 minuter för 2000 W. Att sensor T4 inte följer samma mönster med ökande tidskonstanter som de andra sensorerna med ökande effekt kan bero på att stegsvaret inte riktigt följer en exponentialfunktion på denna plats.

T3 och T4:s lägre tidskonstanter jämfört med T1 och T2 beror för T3 på att rummets ventilation innebär att luften rör sig från ytterväggen mot dörren. Eftersom sensor T3 var uppklistrad på väggen hamnade den mitt i draget. För sensor T4 gällde, eftersom den låg i fönsterkarmen att det sker kallras längs fönstret (kall luft som tränger igenom väggen utifrån bildar en luftström som transporteras ner mot fönsterkarmen samtidigt som den varma luften stiger), och det uppstod en luftvirvel framför fönstret, som gör att temperaturen i fönsterkarmen ändras snabbare än vid andra motsvarande bänkytor vid innerväggarna av rummet trots att sensor T4 var bakom elementet.

På platser där luften rör sig, påverkas temperaturen snabbare av förändringar. Förhållandet mellan starttemperaturerna på de olika platserna är ungefär de samma, trots att testerna utfördes under olika dagar (vid kallt väder utomhus).

De beräknade ekvationerna stämmer relativt väl överens med mätvärdesgraferna. Dock stiger mätvärdesgraferna snabbare i början än ekvationsgraferna, vilket visar att stegsvaren inte riktigt följer en exponentialfunktion. En modell av en högre ordning skulle blivit noggrannare, men examensarbetaren anser att modellen som använts är tillräckligt noggrann.

Tidskonstanten kan användas till att reglera uppvärmningen av rummet, så att den har ett visst värde vid en given tidpunkt. Den här modellen kan alltså användas för att prediktera och reglera temperaturnivån i ett rum vilket besvarar problemformulering 1.

5.2. Laststörning med fönster

Två mätomgångar av koldioxidnivå och temperatur gjordes. Skillnaden mellan dem var vindstyrkan utomhus och placeringen av koldioxidmätaren.

Resultatet av mätningarna visar att koldioxidnivån minskar på ett sätt som ganska väl följer en exponentialfunktion, medan temperaturen minskar linjärt. Detta är en enkel modell för hur temperatur och koldioxid korrelerar, som efterfrågas av problemformulering 2a.

Det skulle kunna gå att styra både koldioxidnivå och temperatur genom att variera luftflödet (problemformulering 2b). Man kan se fönstret som en ventilation i experimentet.

5.3. Reflektion över etiska aspekter

Examensarbetet innehåller inte någon konfidentiell information. Datan som examensarbetaren har samlat in är mätt i examensarbetarens egen lägenhet, så ingen kan ta skada av den.

För att kunna använda examensarbetets resultat till att i förväg starta ventilation och värme, måste man veta schemat för när människor ska vara i rummet. Detta kan bli ett etiskt dilemma för att människorna inte får komma när de vill till rummet och ha ett bra inomhusklimat. Anställda människor som arbetar i kontoret kan uppleva sig vara övervakade.

Samhällsnyttan av examensarbetet inträffar om människorna som arbetar i konstorsrummet har ett bra inomhusklimat redan när de går in i rummet, så att de mår bättre. Dessutom sparas energi om inte ventilation och uppvärmning behöver vara igång alltid.

5.4. Framtida utvecklingsmöjligheter

I framtiden kan man utveckla examensarbetet med att undersöka de andra faktorerna för inomhusklimat. I första hand gäller det luftkvalitet i övrigt förutom koldioxid: relativ luftfuktighet, partiklar och radon.

Examensarbetet skulle kunna vidareutvecklas om man registrerade när det finns människor närvarande för att sedan låta

systemet lära sig till exempel med maskininlärning när värme och ventilation ska slås på.

6. Källförteckning

- [1] <https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/miljohalsa-och-halsoskydd/tillsynsvagledning-halsoskydd/luftkvalitet/>
- [2] Svensk Ventilation, ”*Bäst i klassen – en bok om lönsamt inneklimat*,” Växjö, Paulas Byrå, ISBN 91-631-9531-3, 2006.
- [3] <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/luftfuktighet-1.3910>
- [4] <https://careforindoorair.blog/english/what-is-good-indoor-air/>
- [5] M. Pinterić, ”*Building Physics From Physical Principles to International Standards*,” Cham (Schweiz), Springer International Publishing AG, ISBN 978-3-319-57484-4, 2017.
- [6] G. Sevilgen och M. Kilic, ”Numerical analysis of air flow, heat transfer, moisture transport and thermal comfort in a room heated by two-panel radiators,” *Energy and Buildings*, vol.43, no.1, 137-146, januari 2011.
- [7] T. Teleszewski och K. Gładyszewska-Fiedoruk, ”The concentration of carbon dioxide in conference rooms: a simplified model and experimental verification,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol.16, 8031-8040, maj 2019.
- [8] <https://careforindoorair.blog/>
- [9] A. Bhatia, ”*Cooling Load Calculations and Principles*,” Stony Point (New York), Continuing Education and Development, Inc.
- [10] <https://www.folkhalsomyndigheten.se/>
- [11] L. M. Candanedo och V. Feldheim, ”*Accurate occupancy detection of an office room from light, temperature, humidity and CO2 measurements using statistical learning models*,” *Energy and Buildings*, vol.112, no.1, 28-39, juli 2015.

- [12] C. Ellis, M. Hazas och J. Scott, ”*Matchstick: A Room-to-Room Thermal Model for Predicting Indoor Temperature from Wireless Sensor Data*”, Philadelphia (Pennsylvania), IEEE, ISBN 978-1-4503-1959-1, 2013.
- [13] T. Lu, X. Lü, och M. Viljanen, “A novel and dynamic demand-controlled ventilation strategy for CO₂ control and energy saving in buildings,” *Energy and buildings*, vol.43, no.1, 2499-2508, oktober 2010.
- [14] http://rauni.iea.lth.se:8074/eief30/pdf/Reglerovn_02.pdf
- [15] <https://www-nese.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/ventilation>
- [16] Ian Sommerville, ”*Software Engineering*”, Boston, Pearson Education, ISBN 978-0-13-705346-9, 2011.
- [17] <https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/foreskrifter/arbetsplatsens-utformning-foreskrifter-afs2009-2.pdf>
- [18] <https://www-nese.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/inomhuslimat>
- [19] Bertil Thomas, ”*Modern Reglerteknik*”, Stockholm, Liber AB, ISBN 978-91-47-11212-8, 2016.

7. Bilagor

7.1. Beräkningar som gjordes på testvärdena

Systemet är rummet. Insignalen, P , är elementets effekt, och utsignalen, T , är temperaturen i rummet. Det antogs att temperaturen i lägenheten var en konstant, T_0 , när solen var nere och inte elementet var påslaget. Värmeförlusten, P_{ut} , antogs vara proportionell mot temperaturskillnaden med eller utan elementet påslaget, ekvation (22) gäller.

$$P_{ut} = k(T - T_0). \quad (22)$$

Värmekapaciteten i lägenheten, C_{lgh} , fås genom multiplikation av massan på luften i lägenheten, som fås med ekvation (23), och den specifika värmekapaciteten hos luften. Värdet som användes för luftens densitet var $\rho = 1,2041 \frac{kg}{m^3}$, värdet som användes för luftens specifika värmekapacitet var $C_s = 1004 \frac{J}{kg \cdot K}$ och värdet som användes för lägenhetens volym var $V = 80 m^3$. Då gäller ekvation (24) för värmekapaciteten i lägenheten.

$$m = \rho \cdot V \quad (23)$$

$$C_{lgh} = m \cdot C_s = \rho \cdot V \cdot C_s = 1,2041 \cdot 80 \cdot 1004 \cong 97000 \frac{J}{K} \quad (24)$$

Ekvationen för effektballans i ekvation (25) skrevs, och den laplacetransformerades i ekvation (26).

$$C_{lgh} \frac{dT}{dt}(t) = P(t) - P_{ut}(t) = P(t) - k(T(t) - T_0(t)) \quad (25)$$

$$C_{lgh}sT(s) = P(s) - kT(s) + kT_0(s) \Leftrightarrow T(s) = \frac{P(s) + kT_0(s)}{C_{lgh}s + k} = \quad (26)$$

$$\frac{1}{C_{lgh}s + k} P(s) + \frac{k}{C_{lgh}s + k} T_0(s)$$

Överföringsfunktionen från P till T blir $G_1(s) = \frac{1}{C_{lgh}s+k}$ och överföringsfunktionen från T_0 till T $G_2(s) = \frac{k}{C_{lgh}s+k}$. Det är överföringsfunktionen från P till T som är intressant här.

Insignalen, elementets effekt, är $P(t) = p \cdot \theta(t)$, där p är effekten som elementet startas på, och $\theta(t)$ är stegfunktionen. Stegsvaret blir lika med ekvation (27).

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}^{-1}(G(s) \cdot \mathcal{L}(P(t))) &= \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{C_{lgh}s+k} \cdot \frac{p}{s}\right) & (27) \\
 &= \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\frac{p}{C_{lgh}}}{s\left(s+\frac{k}{C_{lgh}}\right)}\right) = \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{A}{s} + \frac{B}{s+\frac{k}{C_{lgh}}}\right) \\
 &= \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{A\left(s+\frac{k}{C_{lgh}}\right) + Bs}{s\left(s+\frac{k}{C_{lgh}}\right)}\right) \\
 &= \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{(A+B)s + A\frac{k}{C_{lgh}}}{s\left(s+\frac{k}{C_{lgh}}\right)}\right) \\
 &\quad \begin{cases} A+B=0 \\ \frac{k}{C_{lgh}}A = \frac{p}{C_{lgh}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{p}{k} \\ B = -\frac{p}{k} \end{cases} \\
 &= \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\frac{p}{k}}{s} - \frac{\frac{p}{k}}{s+\frac{k}{C_{lgh}}}\right) = \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{p}{k} \cdot \frac{1}{s} - \frac{p}{k} \cdot \frac{1}{s+\frac{k}{C_{lgh}}}\right) \\
 &= \frac{p}{k}\theta(t) - \frac{p}{k}e^{-\frac{k}{C_{lgh}}t}\theta(t) = \frac{p}{k}\left(1 - e^{-\frac{k}{C_{lgh}}t}\right)\theta(t)
 \end{aligned}$$

Examensarbetaren observerade att e-delen av stegsvaret blir mindre och mindre ju längre tid som går. Efter långt tid går därför stegsvaret mot $\frac{p}{k}$ det vill säga att k_0 är lika med $\frac{p}{k}$.

I tabell VI redovisas de uppmätta temperaturvärdena för mätningarna med elementet på 750 W respektive 1250 W.

För 750 W approximerades k_0 till 0,8 och T till 30 minuter. Värdet på k räknades ut till 937,5 W/K. Stegsvaret beräknades genom insättning av värdena i ekvation (27) till $0.8(1 - e^{-0.0097t}) \cdot \theta(t)$, och T för ekvationen beräknades till 103,1 minuter.

För 1250 W approximerades k_0 till 1,8 och T till 44 minuter. Värdet på k räknades ut till 694,4 W/K. Stegsvaret beräknades genom insättning av värdena i ekvation (27) till $1.8(1 - e^{-0.00716t}) \cdot \theta(t)$, och T för ekvationen beräknades till 139,7 minuter.

De grafiska värdena på tidskonstanten jämfördes med de som beräknades med ekvationen. Det blev väldigt stor skillnad.

TABELL VI. TEMPERATUR MED 750 W OCH 1250 W ELEMENT.

Tid (minuter)	T (°C) för 750 W	T (°C) för 1250 W
t_0	21.2	21.2
$t_0 + 2$	21.2	21.2
$t_0 + 4$	21.3	21.4
$t_0 + 6$	21.4	21.5
$t_0 + 8$	21.4	21.6
$t_0 + 10$	21.4	21.7
$t_0 + 12$	21.5	21.8
$t_0 + 14$	21.6	21.9
$t_0 + 16$	21.6	21.9
$t_0 + 18$	21.6	22
$t_0 + 20$	21.6	22
$t_0 + 22$	21.7	22.1
$t_0 + 24$	21.7	22.1
$t_0 + 26$	21.7	22.1

$t_0 + 28$	21.7	22.1
$t_0 + 30$	21.7	22.2
$t_0 + 32$	21.7	22.2
$t_0 + 34$	21.7	22.2
$t_0 + 36$	21.7	22.2
$t_0 + 38$	21.8	22.3
$t_0 + 40$	21.8	22.3
$t_0 + 42$	21.8	22.3
$t_0 + 44$	21.8	22.3
$t_0 + 46$	21.8	22.3
$t_0 + 48$	21.8	22.3
$t_0 + 50$	21.8	22.3
$t_0 + 52$	21.8	22.3
$t_0 + 54$	21.8	22.3
$t_0 + 56$	21.8	22.4
$t_0 + 58$	21.8	22.4
$t_0 + 60$	21.8	22.4
$t_0 + 62$	21.8	22.4
$t_0 + 64$	21.8	22.4
$t_0 + 66$	21.8	22.4
$t_0 + 68$	21.8	22.4
$t_0 + 70$	21.8	22.4
$t_0 + 72$	21.8	22.5
$t_0 + 74$	21.9	22.5
$t_0 + 76$	21.9	22.5
$t_0 + 78$	21.9	22.5
$t_0 + 80$	21.9	22.5

$t_0 + 82$	21.9	22.5
$t_0 + 84$	21.9	22.5
$t_0 + 86$	21.9	22.5
$t_0 + 88$	21.9	22.5
$t_0 + 90$	21.9	22.5
$t_0 + 92$	21.9	22.5
$t_0 + 94$	21.9	22.5
$t_0 + 96$	21.9	22.5
$t_0 + 98$	21.9	22.5
$t_0 + 100$	21.9	22.6
$t_0 + 102$	21.9	22.6
$t_0 + 104$	21.9	22.6
$t_0 + 106$	21.9	22.6
$t_0 + 108$	21.9	22.6
$t_0 + 110$	21.9	22.6
$t_0 + 112$	-	22.6
$t_0 + 114$	21.9	22.6
$t_0 + 116$	-	22.6
$t_0 + 118$	21.9	22.6
$t_0 + 120$	21.9	22.6
$t_0 + 122$	21.9	22.6
$t_0 + 124$	21.9	22.6
$t_0 + 126$	21.9	22.7
$t_0 + 128$	21.9	
$t_0 + 130$	21.9	
$t_0 + 132$	21.9	
$t_0 + 134$	21.9	

$t_0 + 136$	21.9	
$t_0 + 138$	21.9	
$t_0 + 140$	21.9	
$t_0 + 142$	21.9	
$t_0 + 144$	21.9	
$t_0 + 146$	21.9	
$t_0 + 148$	21.9	
$t_0 + 150$	21.9	
$t_0 + 152$	-	
$t_0 + 154$	22	
$t_0 + 156$	21.9	
$t_0 + 158$	21.9	
$t_0 + 160$	-	
$t_0 + 162$	-	
$t_0 + 164$	-	
$t_0 + 166$	22	
$t_0 + 168$	21.9	
$t_0 + 170$	21.9	
$t_0 + 172$	21.9	
$t_0 + 174$	21.9	
$t_0 + 176$	21.9	
$t_0 + 178$	21.9	
$t_0 + 180$	22	
$t_0 + 182$	22	
$t_0 + 184$	22	
$t_0 + 186$	22	
$t_0 + 188$	22	

$t_0 + 190$	22	
$t_0 + 192$	22	
$t_0 + 194$	22	
$t_0 + 196$	22	

7.2. Funktioner i C++

Funktionerna i C++ för beräkning av exponentialfunktionen för elementexperimentet.

```
#include <iostream>
#include <cmath>

using std::cout;
using std::endl;

double c(double h, double s1, double s2, double s3)
{
    return log((s2-s1)/(s3-s2))/h;
}

double b(double s1, double s2, double t1, double t2, double c)
{
    return (s2-s1)/(exp(-c*t2)-exp(-c*t1));
}

double a(double s1, double t1, double b, double c)
{
    return s1-b*exp(-c*t1);
}

double T(double c)
{
    return 1/c;
}
```

```

    }

    void abcT(double h, double s1, double s2, double s3, double t1,
double t2, double t3)
    {
        double cvalue = c(h,s1,s2,s3);
        double bvalue = b(s1,s2,t1,t2,cvalue);
        double avalue = a(s1,t1,bvalue,cvalue);
        cout << "a = " << avalue << ", b = " << bvalue << " and
c = " << cvalue << endl;
        cout << "T = " << T(cvalue) << endl;
    }

    int main()
    {
        double s1 = 21.9, s2 = 22.4, s3 = 22.8, t1 = 0, t2 = 60, t3
= 120;
        // Värdena ändras här!
        double h = t2-t1;
        abcT(h,s1,s2,s3,t1,t2,t3);
        return 0;
    }

```