

# Grundlæggende programmering

## Workshop II: Kølerum



T. Kallehauge, M. V. Vejling, J. J. Nielsen

November 18, 2024

## Introduktion

Denne workshop omhandler temperaturudviklingen i et kølerum. Kølerummet tilhører en populær restaurant, og dets medarbejdere åbner ofte for døren til rummet for at hente og opfylde diverse madvarer. Med de stigende energipriser er det imidlertid blevet dyrt for restauranten at drive rummet, og derfor har restauranten overvejet at udskifte den nuværende termostat med en intelligent enhed, som kan tage højde for skiftende elpriser. Den intelligente enhed skal således prøve at minimere prisen for at drive kølerummet, men skal samtidig holde temperaturen tæt ved  $5^\circ$ , da madvarerne i køleskabet ellers bliver dårlige og skal smides ud.

Opgaven i denne workshop er først at simulere temperaturudviklingen i kølerummet med den nuværende termostat. Prisen for elektricitet og eventuelle tab af madvarer hvis temperaturen divergerer fra  $5^\circ$  skal også simuleres. Dernæst er det jeres opgave at programmere en intelligent enhed til at styre kølerummet, så restauranten forhåbentlig kan hænge økonomisk sammen i fremtiden.

## Modellering

Kølerummet er et komplekst system bestående af flere elementer herunder *temperaturudviklingen*, *termostaten*, *brug af kølerummet*, *elpris og forbrug* samt *tab af madvarer ved for høje/lave temperaturer*. Vi simulerer hver enkelt del ved brug af matematiske modeller, generering af tilfældige tal samt import af data. Vi gør også brug af et vigtigt redskab indenfor simulering nemlig *diskretiseringen*, hvor man i stedet for at arbejde med kontinuert tid, arbejder med diskrete intervaller.

### Diskret tid

Eksperimentet tager udgangspunkt i september måned 2022, som deles op i intervaller af fem minutter hvilket giver i alt  $N = 8640$  intervaller. Tiden i 5 minutters intervaller noteres ved variablen  $n$  gående fra 0 til  $N$ . Her svarer  $n = 0$  minutter til d. 1. september kl. 00:00,  $n = 1$  til d. 1. september kl. 00:05, og så videre. Det sidste tidspunkt  $n = N$  svarer til 1. oktober kl. 00:00.

### Temperaturudviklingen

Kølerummet fungerer ved at en kompressor enten er tændt eller slukket. Er kompressoren tændt vil temperaturen falde og omvendt. Temperaturen påvirkes også af om døren til rummet er åben eller lukket. Dette giver os følgende model

$$T[n] = T[n - 1] + (C_1(T_{\text{rum}} - T[n - 1]) + C_2(T_{\text{komp}} - T[n - 1])) \Delta t, \quad (1)$$

hvor

- $T[n]$  er temperaturen i grader til tidspunkt  $n$  ( $T[n-1]$  er altså temperaturen til tidspunkt  $n-1$ ).
- $T_{\text{rum}} = 20^\circ$  er temperaturen uden for fryserummet.
- $T_{\text{komp}} = -5^\circ$  er temperaturen som ”kompressoren køler med”.
- $C_1$  er frekvensen for temperaturtab til omgivelserne. Den er givet ved den stykvisse funktion

$$C_1 = \begin{cases} 5 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} & \text{hvis døren er lukket} \\ 3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} & \text{hvis døren er åben} \end{cases}, \quad (2)$$

hvor  $s$  står for sekunder.

- $C_2$  er frekvensen for køling ved brug af kompressoren. Den er givet ved den stykvisse funktion

$$C_2 = \begin{cases} 0 \text{ s}^{-1} & \text{hvis kompressoren er slukket} \\ 8 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1} & \text{hvis kompressoren er tændt} \end{cases}. \quad (3)$$

- $\Delta t = 300 \text{ s}$  omregner fra sekunder til 5 minutter.

Temperaturen starter ved  $5^\circ$ , altså  $T[0] = 5^\circ$ .

**Eksempel** Til tidspunkt  $n = 10$  er temperaturen  $T[10] = 5.02^\circ$ . I de næste 5 minutter er døren lukket og kompressoren er tændt. Vi har således:

$$T[11] = 5.02^\circ + (5 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}(20^\circ - 5.02^\circ) + 8 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}(-5^\circ - 5.02^\circ)) 300 \text{ s} \approx 4.998^\circ \quad (4)$$

## Termostaten

Den nuværende termostat er meget simpel, og fungerer ved at tænde termostaten når temperaturen er under den ønskede temperatur og er ellers slukket. Termostaten fungerer i intervaller af fem minutter, og vil derfor køle hele fem minutter hver gang den ønskede temperatur overstiges. Den ønskede temperatur er  $T_{\text{mål}} = 5^\circ$ . Vi kan skrive dette matematisk ved at definere funktionen

$$\text{termostat}[n] = \begin{cases} \text{tændt} & \text{hvis } T[n] > T_{\text{mål}} \\ \text{slukket} & \text{hvis } T[n] \leq T_{\text{mål}} \end{cases}, \quad (5)$$

hvor  $\text{termostat}[n]$  beskriver om termostaten er tændt i intervallet fra tidspunkt  $n$  til tidspunkt  $n+1$ .

**Eksempel** Til tidspunkt  $n = 10$  er temperaturen  $5.02^\circ$  og derfor er  $\text{termostat}[10] = \text{tændt}$ . Efter 5 minutter er temperaturen nu nede på  $4.998^\circ$  og derfor er  $\text{termostat}[11] = \text{slukket}$ .

## Brug af kølerummet

Brugen af kølerummet modelleres statistisk ved at beskrive sandsynligheden for at døren er åben. Vi forsimpler problemet ved at antage at døren altid åbnes på hele antal minutter og altid 5 minutter ad gangen. Vi har således sandsynligheden

$$P = \text{sandsynlighed for at døren er åben} = 10\%. \quad (6)$$

**Eksempel** Fra tidspunkt  $n = 10$  til  $n = 20$  åbnes døren tilfældigvis to gange i tidsintervallerne 11 til 12 og 19 til 20.

## Elpris og forbrug

Elprisen er fastlagt af markedet og er givet i kroner per kilo Watt time, der skrives som kr./kWh (fra det engelske kilowatt-hours). Elprisen ændrer sig hvert 5. minut og noteres som  $\text{elpris}[n]$  for elprisen fra  $n$  til  $n + 1$ . Datasættet `elpris.csv` kan hentes på Moodle og indeholder prisen for elektricitet i september 2022 i 5 minutters intervaller.

Kølerummet bruger kun strøm når kompressoren er tændt. Når kompressoren er tændt bruges  $W_{\text{komp}} = 1$  kWh for hvert 5. minut. Vi har således forbruget fra tidspunkt  $n$  til  $n + 1$

$$\text{forbrug}[n] = \begin{cases} \text{elpris}[n] \cdot W_{\text{komp}} \text{ kr.} & \text{hvis kompressoren er tændt} \\ 0 \text{ kr.} & \text{hvis kompressoren er slukket} \end{cases}. \quad (7)$$

**Eksempel** Til tidspunkt  $n = 10$  er elprisen 3.61 kr./kWh og kompressoren er tændt i de næste 5 minutter. Det koster således  $\text{forbrug}[10] = 3.61 \text{ kr./kWh} \cdot 1 \text{ kWh} = 3.61 \text{ kr.}$  i strøm for de næste 5 minutter.

## Tab af madvarer ved for høje/lave temperaturer

Hvis temperaturen i kølerummet kommer fra langt fra  $5^\circ$  begynder madvarerne at blive dårlige. Mellem  $3.5^\circ$  og  $6.5^\circ$  kan varerne holde sig, og udenfor dette interval bliver varerne dårlige. Restauranten har nøje regnet på hvad det koster at have den forkerte temperatur i kølerummet, og er kommet på en funktion for hvad det i princippet koster i dårlige madvarer at have kølerummet ved en bestemt temperatur i 5 minutter. Funktionen er givet således

$$\text{madpris}(T) = \begin{cases} 4.39e^{-0.49T} \text{ kr.} & \text{hvis } T < 3.5^\circ \\ 0 \text{ kr.} & \text{hvis } 3.5^\circ \leq T < 6.5^\circ \\ 0.11e^{0.31T} \text{ kr.} & \text{hvis } T \geq 6.5^\circ \end{cases} \quad (8)$$

**Eksempel** Til tidspunkt  $n = 20$  er temperaturen  $T[20] = 7^\circ$  og prisen for dårlige varer er således  $\text{madpris}(7^\circ) = 0.11e^{0.31 \cdot 7^\circ} = 0.96 \text{ kr.}$  Bemærk at vi i denne beregning antager at temperaturen er konstant fra tidspunkt 20 til 21.

## Total udgift

Den totale udgift er summen af forbrug samt spild af mad i september måned. Vi kan udregne den således

$$\text{udgift} = (\text{forbrug}[0] + \text{madpris}(T[0])) + \cdots + (\text{forbrug}[N-1] + \text{madpris}(T[N-1])) \quad (9)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} (\text{forbrug}[n] + \text{madpris}(T[n])) \quad (10)$$

Bemærk at tidspunktet  $n = N$  ikke medregnes da dette tidspunkt er i oktober.

Det månedlige budget for kølerummet og madspild er 12000 kr.

Til sidst bemærkes det, at den totale udgift for september måned er tilfældig i den forstand at det er tilfældigt hvor ofte døren bliver åbnet. Her kan vi bruge Monte-Carlo simulering til at udregne den gennemsnitlige pris ved at simulere udgiften i september mange gange, og så udregne gennemsnittet af udgiften i simuleringerne. Simuleres udgiften  $M$  gange  $\text{udgift}_1, \dots, \text{udgift}_M$  er gennemsnittet således

$$\text{gennemsnitlig udgift} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \text{udgift}_m \quad (11)$$

## Problemet

I workshopen stilles to opgaver:

1. Simuler kølerummet, og udregn den gennemsnitlige udgift for september 2022 når den eksisterende termostat bruges. Bestem ud fra dette om restauranten kan overholde det månedlige budget.
2. Eksperimenter nu med en intelligent termostat ved at omdefinere ligning (5). Elpriserne kendes som regel på forhånd, og det antages derfor at den intelligente termostat har adgang til elpriserne i fremtiden. Det kan dog ikke forudsiges hvornår døren åbnes. Bestem herefter nu om restauranten ved hjælp af den intelligente termostat kan overholde sit budget (det er IKKE et krav at den kan). Vi forventer ikke at i bruger mange timer på denne opgave, men prøv at være lidt kreative og eksperimenter med løsningerne. I må meget gerne arbejde sammen med jeres gruppe til dette! Hvad er den laveste gennemsnitlige totale udgift I kan opnå?

## Krav til løsning

Koden til løsningen afleveres i slutningen af workshopen. Følgende krav er givet:

- Programmet skal kunne løse opgave 1. og 2. herover.
- Programmet skal skrives objektbaseret med minimum én klasse – undgå således kode udenfor klasserne og globale variable så vidt muligt. Til hver metode skrives en passende docstring.
- Til minimum 3 af funktionerne/metoderne skrives en doctest, der kan bruges med Pythons `doctest` modul. Implementer automatisk doctest af disse ved brug af `if __name__ == "__main__":` syntaxen.
- Programmet skal opdeles i minimum 2 moduler (Python scripts)<sup>1</sup>. Til hvert modul skrives en passende docstring i starten af filen.

## Dokumentation af løsning

Din løsning skal dokumenteres med en lille rapport, der uploades som pdf-fil sammen med din kode. Dokumentationen kan skrives i MS Word/Latex eller kan laves som slideshow eksempelvis i MS Powerpoint. Dokumentationen må fylde maksimalt 5 A4 sider eller 10 slides. Dokumentationen skal som minimum indeholde følgende:

- Resultat for gennemsnitlig udgift for den simple termostat.
- En beskrivelse af den intelligente termostat, du har implementeret og den gennemsnitlige udgift den giver.
- Minimum 3 plots, der illustrerer problemet og dets løsning samt sammenligning med simpel termostat. Her er et par ideér til plots:
  - Tidsserieplot af temperaturen i kølerummet i løbet af en uge (det kan være svært at forholde sig til en hel måned i et plot).
  - Tidsserieplot, der viser både udgiften per 5 minutter til el og madspild hen over en uge.
  - Histogram over udgift per 5 minutter i september.
- Et kort resume af resultaterne fra de to opgaver: Hvad er den gennemsnitlige månedlige udgift ved de to typer termostater og kan restauranten overholde sit budget?

## Opgaver i workshop II

Følgende opgaver er givet:

---

<sup>1</sup>En mulig opdeling er et modul til simulering af kølerummet og den månedlig udgift med forskellige termostater. Det andet modul kan så bruges til at udregne den gennemsnitlige udgift og generere plots, der viser resultaterne.

- Forstå hvordan kølerummet og udgifter simuleres og forstå problemet.
- Lav en plan for hvordan programmet skal opbygges. Hvilke funktioner/metoder og moduler skal implementeres?
- Implementer programmet i Python jævnfør ovenstående krav og lav dokumentationen.