

Optimal styring af ventilationsanlæg

Erik Bjørn, Head of Technology and Innovation

AIRMASTER

28-01-2025

Agenda

1. Kort introduktion af EUDP project, herunder AMX produktet
2. Forsøg hos Teknologisk Institut
3. Kort introduktion af Model Predictive Control
4. Resultater

EUDP (oprindelig ELFORSK) projekt 353-023

- Development of adaptive control for intelligent energy-efficient heat pump-driven ventilation system
- Projektansvarlig Teknologisk Institut, partner Airmaster A/S
- Projektet startet i 2021 og afsluttet ultimo 2024

AMX 4:

- Autonom styring, "plug and play" installation
- Ventilation eller recirkulering
- Varme- og kølegenvinding
- Opvarmning eller køling
- Reversibel varmepumpe
 - R290 propan kølemiddel
- Ingen udvendige dele
 - Patenteret lyddæmpning af kompressor
- Design af CF Møller



Styring af både atmosfærisk og termisk indeklima

- AMX 4 påtager sig styring af både atmosfærisk atmosfærisk Indeklima som et ventilationsanlæg
- Desuden styring af termisk Indeklima. Det gør ventilationsanlæg oftest i et eller andet omfang ved at nedbringe overtemperaturer
- AMX 4 bruger desuden den indbyggede varmepumpe til at aktivt varme eller køle og dermed styre rumtemperaturen
- Denne dobbeltrolle medfører nogle modsætninger eller konflikter, der skal løses

Konflikter, der skal håndteres

- Ventilation: Vi ønsker gennemskylning af hele rummet med frisk luft
- Ved køling: Kold stråle har en tendens til at falde ned midt i rummet – ikke gennemskylning
 - Kold stråle øger trækrisiko – behov for at begrænse kølekapacitet
- Ved opvarmning: Varm stråle kan lægge sig under loftet
 - Kortslutning af indblæsning og udsugning, ringere luftkvalitet
 - Temperaturlagdeling, ubehag pga. Temperaturgradient, usikkerhed om rumtemperatur
 - Behov for at begrænse varmekapacitet
- Energiforbrug kontra indeklime: Både ventilation, opvarmning, og køling koster energi
 - Energi: Behov for at begrænse energiforbrug
 - Indeklima: Behov for bruge tilstrækkelige luftmængder og tilstrækkelig opvarmning/køling

Hvad vil det sige, “adaptive control”?

- Airmasters eksisterende styring er i dag, sine øvrige kvaliteter ufortalt, en “reaktiv” styring, den reagerer kun på input fra sensorer og/eller et forudbestemt tidsskema
- Vi ville gerne udvikle en styring, som er “proaktiv” og som selv tilpasser sig situationen
 - Agere ud fra en vejrudsigt
 - Udnytte strøm, når det er billigt
 - Tilpasse sig bygningen og dens anvendelse
- Eksempel: Hvis det bliver varmt imorgen, og strømmen er billig nu – gå i gang med at køle nu, og i rette omfang – så der hverken er for koldt eller for varmt imorgen
- En andet “adaptivt” aspekt: Tilpasse indblæsning efter forholdene, luftmængder og temperaturer, så der opnås bedst mulig indeklima

EUDP projektets fokus

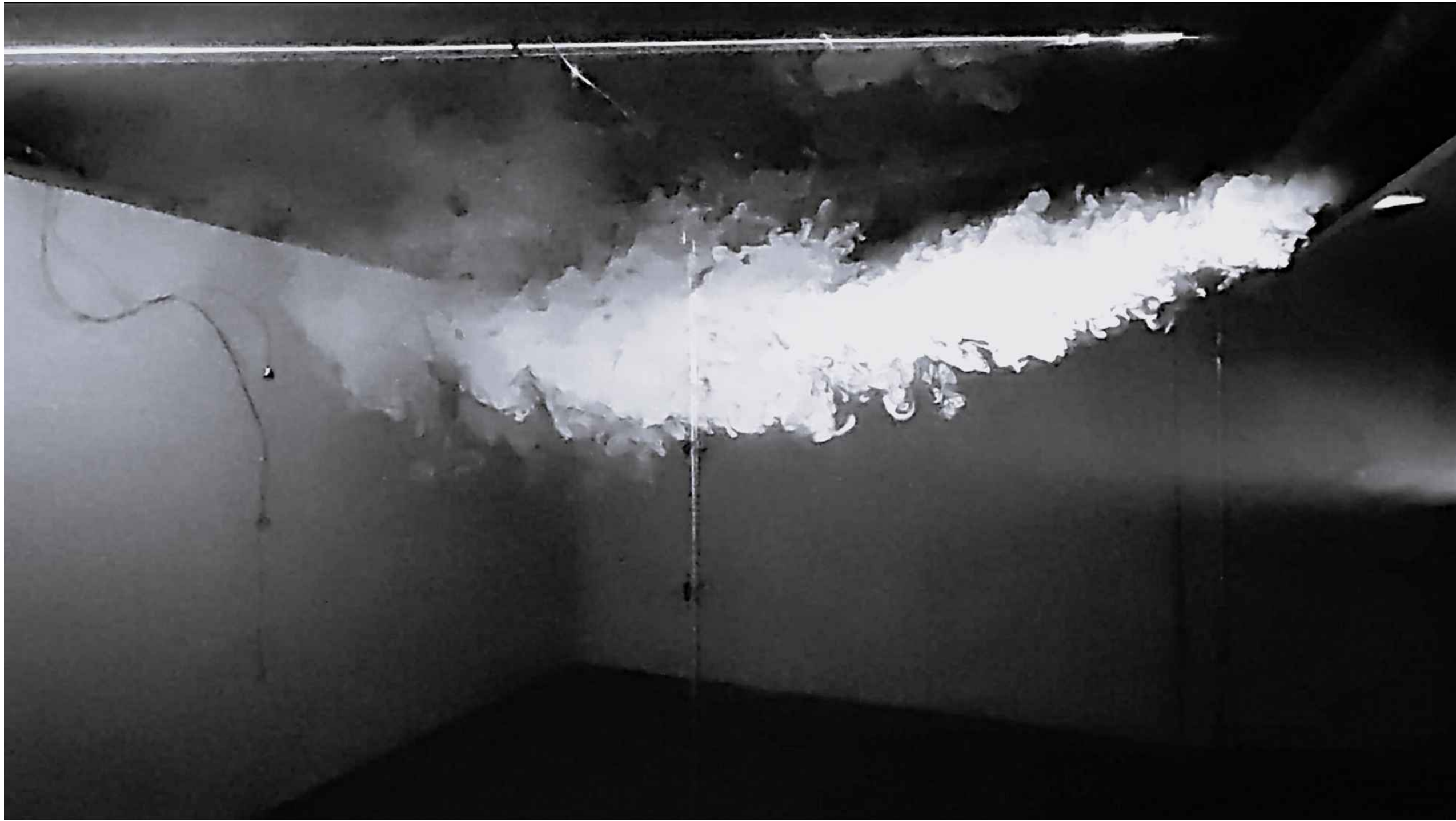
- En bærende idé har været at kunne forudse, hvilket energiforbrug, der bliver behov for i den næmeste fremtid, og så forberede situationen
 - Køle eller varme på forhånd
 - Ventilere på forhånd
- Metoden til at opnå dette er “Model Predictive Control”
- Den fysiske opførsel mht masse- og energibalance af både rummet og anlægget beskrives med differentialligninger
- Påvirkninger (randværdier) defineres dels med vejrudsigter, dels med brugsskemaer (tilstedeværelse af personer)

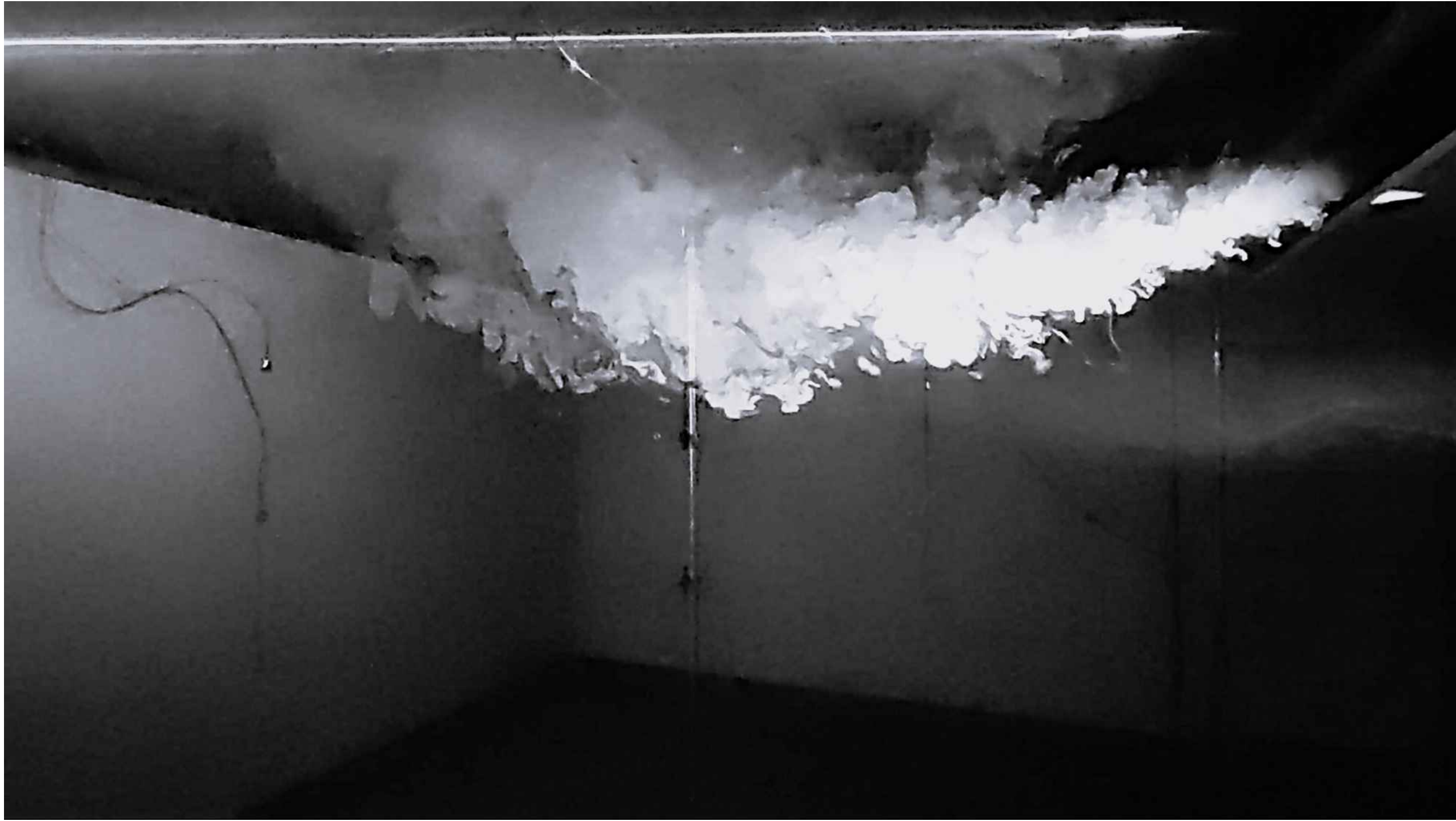
Målinger i klimalaboratorium på Teknologisk



AIRMASTER









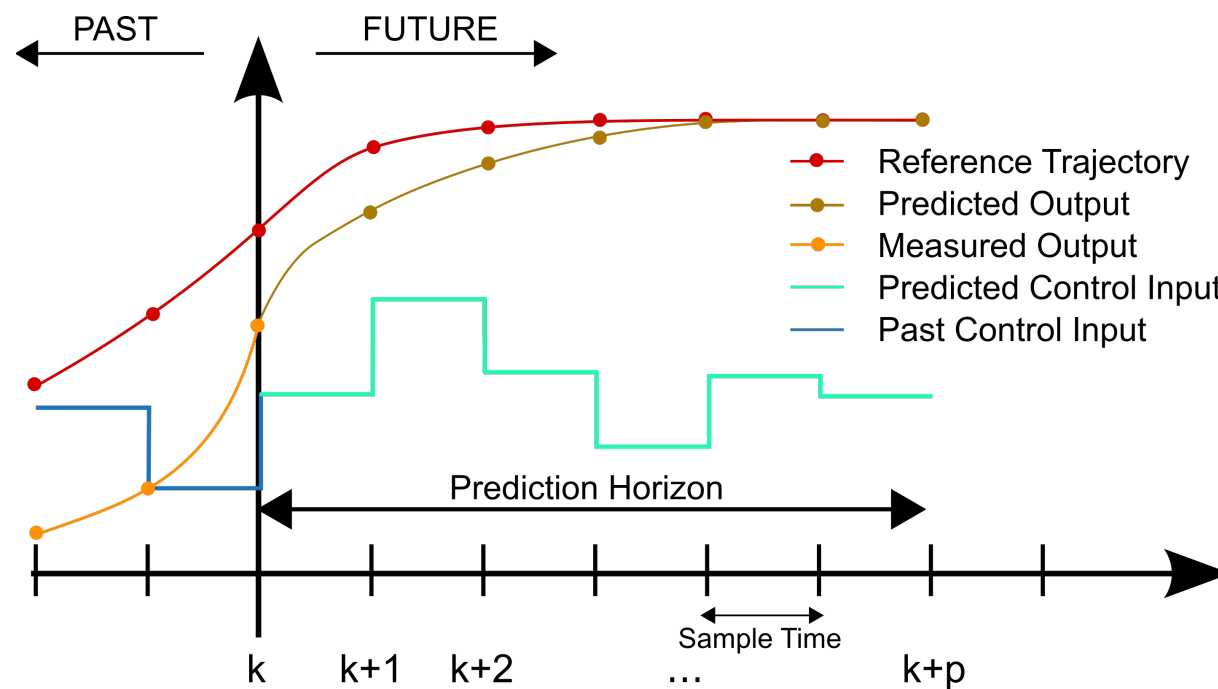
Hvad lærte vi i laboratoriet?

- Strømningsmønster afhænger af lufthastighed, overtemperature, og lamellernes vinkel
- Dvs. afhængig af Archimedes tal og geometrien, måske ikke overraskende
- Vi kan styre strømningen med horisontale lameller indenfor visse grænser
- Hvis AR bliver for stor, kan vi ikke styre det, dette skal undgås
- Der er udviklet en styringsalgoritme til at sikre dette
- Angående hastigheder i opholdszone: Hastigheder falder meget hurtigt pga opdrift. Stråle føles ikke ukomfortabel ved relevante archimedestal.
 - Definition af “træk” dækker sådan set ikke en varm stråle?
 - Mangler vi generelt en model for discomfort ved varm luft?

Model Predictive Control

En Model Predictive Controller (MPC) er en avanceret metode inden for processtyring, der anvender en matematisk model af systemet til at forudsige fremtidige output og optimere input.

MPC løser et optimeringsproblem ved hvert tidsstep for at minimere en omkostningsfunktion og opfylde systemets begrænsninger, hvilket sikrer effektiv og robust styring i komplekse og dynamiske miljø.



MPC implementering

1. Modellering af Systemet:

1. Opret en matematisk model af systemet.

2. Forudsigelse af Fremtidige Output:

1. Brug modellen til at forudsige output over en forudsigelseshorisont.

3. Optimering med Omkostningsfunktion:

1. Løs et optimeringsproblem for at minimere en omkostningsfunktion (f.eks. afvigelse fra mål, energiforbrug) og opfylde systembegrænsninger.

4. Implementering af Første Input:

1. Implementer kun det første input i den optimale sekvens.

5. Feedback og Opdatering:

1. Brug feedback til at opdatere modellen og forudsigelserne.

6. Rekursion:

1. Gentag trinene kontinuerligt.

AIRMASTER

Rummodel - 2. Ordensdifferentialligning

$$\frac{\partial T_{luft}}{\partial t} = \frac{Q_{HVAC} + Q_{sun} \cdot A_{vindue} + (T_{ude} - T_{luft}) \cdot k_{ude-luft} + (T_{væg} - T_{luft}) \cdot k_{væg-luft}}{c_{luft}}$$

$$\frac{\partial T_{væg}}{\partial t} = \frac{(T_{luft} - T_{væg}) \cdot k_{væg-luft}}{c_{væg}}$$

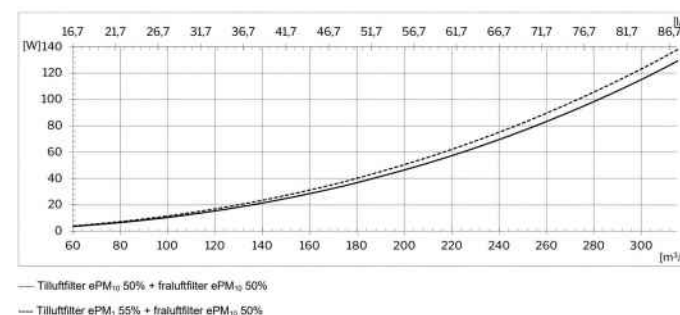
Aggregat model (Elforbrug)

$$P_{el} = P_{stby} + P_{vent} + P_{vp}$$

$$Q_{HVAC} = P_{vp} \cdot COP(\Delta T)$$

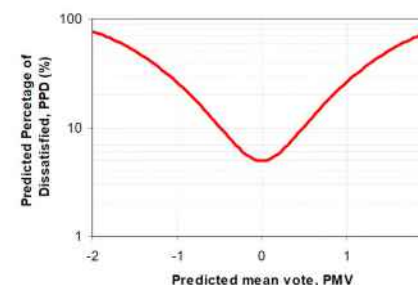
$$COP(\Delta T) = \frac{T_{min} + 273.16 - \Delta T_{loss}}{(T_{max} + 273.16 + \Delta T_{loss}) - (T_{min} + 273.16 - \Delta T_{loss})} \cdot \eta + 1$$

$P_{vent} \dots$ Effektförbruk



Komfortmodel (Indeklima)

PMV:



MPC implementering

1. Modellering af Systemet:

1. Opret en matematisk model af systemet.

2. Forudsigelse af Fremtidige Output:

1. Brug modellen til at forudsige output over en forudsigelseshorisont.

3. Optimering med Omkostningsfunktion:

1. Løs et optimeringsproblem for at minimere en omkostningsfunktion (f.eks. afvigelse fra mål, energiforbrug) og opfylde systembegrænsninger.

4. Implementering af Første Input:

1. Implementer kun det første input i den optimale sekvens.

5. Feedback og Opdatering:

1. Brug feedback til at opdatere modellen og forudsigelserne.

6. Rekursion:

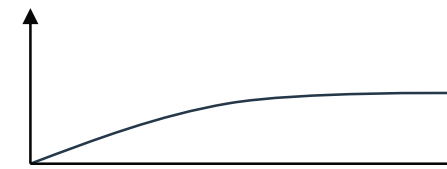
1. Gentag trinene kontinuert.

AIRMASTER

Rummodel - 2. Ordensdifferentialligning

$$\frac{\partial T_{luft}}{\partial t} = \frac{Q_{HVAC} + Q_{sun} \cdot A_{vindue} + (T_{ude} - T_{luft}) \cdot k_{ude-luft} + (T_{væg} - T_{luft}) \cdot k_{væg-luft}}{c_{luft}}$$

$$\frac{\partial T_{væg}}{\partial t} = \frac{(T_{luft} - T_{væg}) \cdot k_{væg-luft}}{c_{væg}}$$



Prognose

Vejrudsigten hentes fra API.



Udetemperatur og solindstråling benyttes i dynamisk model.

MPC implementering

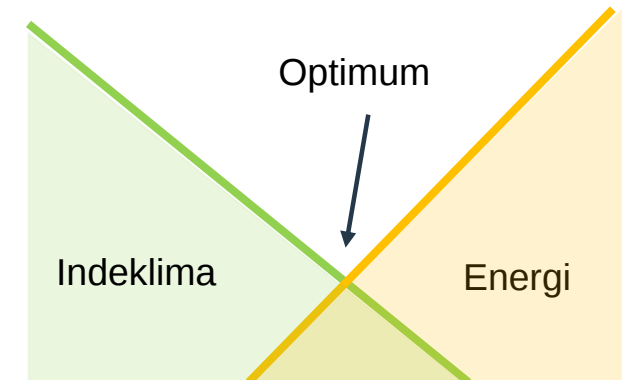
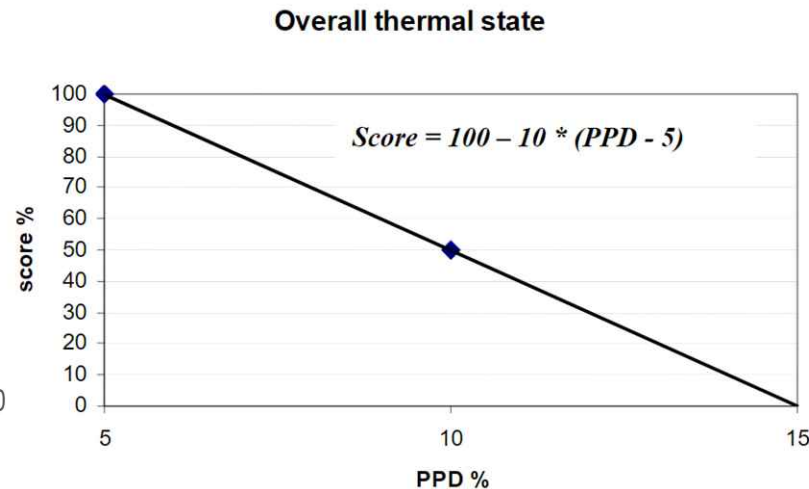
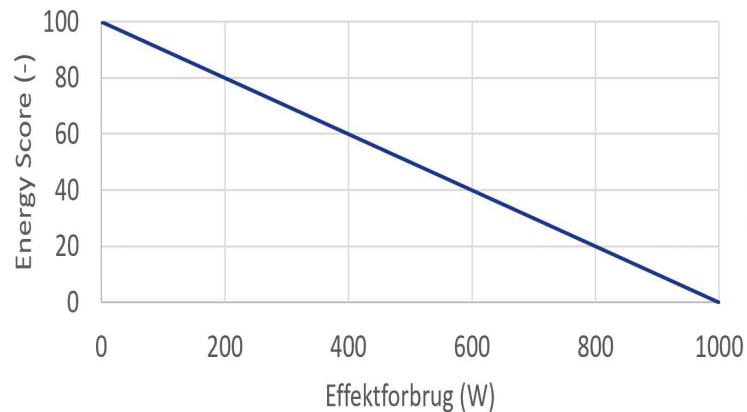
En omkostningsfunktion defineres og normaliseres (Indeklima vs. Elforbrug)

Optimering med Omkostningsfunktion:

Løs et optimeringsproblem for at minimere en omkostningsfunktion (Indeklima, energiforbrug) og opfylde systembegrænsninger.

$$Cost = 100 - Eco_{factor}$$

$$Eco_{factor} = W \cdot Eco_{factor,energi} + (1 - W) \cdot Eco_{factor,indeklima}$$



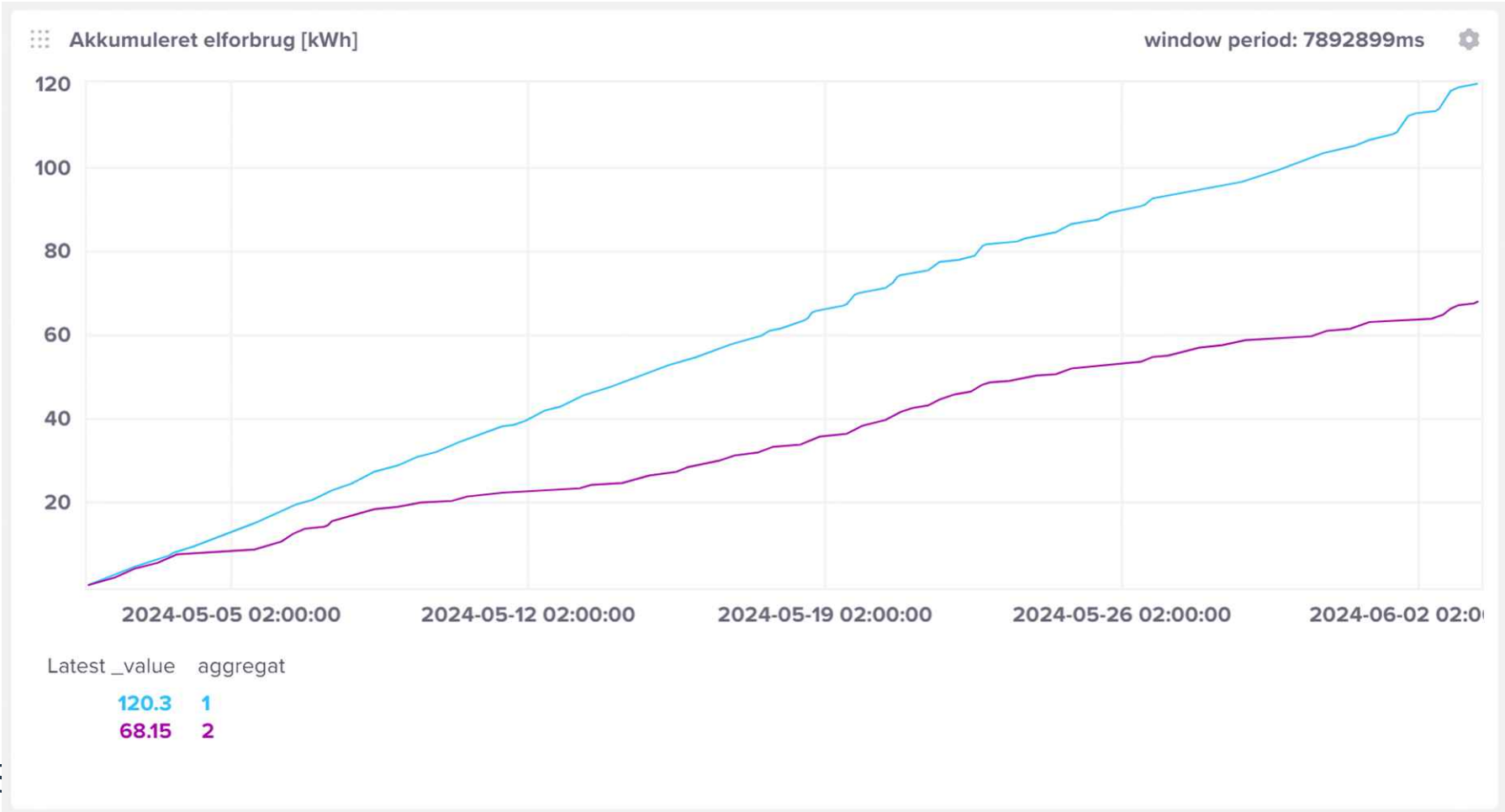
Sammenlignende fuldskala test



El-forbrug Maj måned

Den procentvise besparelse varierer mellem 40- til 50%.

Elmåler aflæsninger



AIRMAS

Konklusioner

- Der er opnået forbedringer af indblæsningsdiffusor ved samtidig styring af luftkvalitet, rumtemperatur, og tiltag for at undgå lokal termisk discomfort.
 - Det er især væsentligt at undgå termisk stratificering, da dette skaber uklarhed om, hvilken rumtemperatur der styres efter. Der er opnået bedre viden herom og metoder til at undgå det.
- Det er lykkedes at lave en fungerende styring med Model Predictive Control, der inddrager vejrudsigter og elprisprognoser. Gode forudsigelser af solindstråling er vigtige.
- Det er demonstreret ved fuldskala forsøg, at en proaktiv styring med Model Predictive Control medfører væsentlige energibesparelser sammenlignet med en “reaktiv” styring.
- Det er demonstret, at man kan opnå viden om rummets termiske egenskaber udelukkende ved analyse af målte data.
- Det er vigtigt for MPC modellens effektivitet at kunne lave gode estimater af rummets termiske egenskaber
- Det er væsentligt at have gode estimater af forventet brugeradfærd
 - Det forventes at machine learning metoder vil kunne bibringe yderlig forbedring og energibesparelse