

**SOLCELLEANLÆGGET MEJLGADE**  
DIGITAL TVILLING TIL OPTIMERING AF  
BATTERIDRIFT – AFSLUTTENDE ARBEJDSPAPIR

**FEBRUAR 2024**

---

Opsummering Februar 2024.....	3
Metodik og aktiviteter .....	3
Hovedresultater og Konklusion .....	3
Artifakten .....	3
samarbejdspartnere og interessenter .....	5
Observationer .....	6
Projektets efterliv .....	8
Bilag .....	10
Installationen på Mejlgade.....	11
Datastrømme.....	12
DIY-opskrift til NODE RED moduler .....	13
Formidling af resultater .....	15

# OPSUMMERING FEBRUAR 2024

## METODIK OG AKTIVITETER

Projektets metode er baseret på action research design. Metoden er baseret på at man bygger et artefakt og i processen observere på hvad der sker i organisationen og omgivelserne.

Artefaktet er i dette tilfælde to digitale tvillinger til styring og evaluering af solcelleanlægget på Mejlgade. Ønsket med artefaktet er at kunne belyse følgende;

*Hvilken sværhedsgrad er forbundet med udarbejdelsen af digitale tvillinger, en til styring og en til evaluering af styringsstrategier?*

Projektets aktiviteter udgøres af

- Udarbejdelse af digitale tvillinger
- Integration med anlæggets styresystem
- Involvering af og dialog med professionen
  - Solcelleejere – Sinding & Co og Aarhus Kommune
  - Teknisk overvågning af solcelleanlæg – Evishine
  - Batteripakkeproducent – Visblue
- Formidling af resultater

## HOVEDRESULTATER OG KONKLUSION

### ARTIFAKTEN

Projektet havde som mål at lave to digitale tvillinger, A) en statistisk/AI baseret tvilling der kan lave styringsscenarier optimeret til drift af solcelleanlægget den næstfølgende dag og B) en deterministisk digital tvilling der med nogle dages forsinkelse kan beregne hvad den bedste løsning ville have været. Tanken var at man på den måde kunne løbende evaluere på performance på tvilling A. Desuden kunne beregningerne også anvendes til at

evaluere på om investeringen i solcelleanlægget havde det ønskede økonomiske og CO<sub>2</sub>-mæssige overskud.

#### TVILLING B – REALISERET VS. OPTIMAL STYRING

Tvillingen er opbygget i Home Assistant ved hjælp af deres scripting modul. Vi er i stand til præcist at beregne økonomien og CO<sub>2</sub> reduktionen i forhold til tre scenarier, 1) uden anlæg, 2) kun med solceller og 3) solcelle og batterier (som bygget). Vi kan beregne dels det realiserede forløb og dels et optimalt forløb.

#### TVILLING A – EN PROGNOSE/AI BASERET STYRING

Tvillingen er opbygget i Python og anvender tilhørende AI biblioteker. Vi har forsøgt at følge diverse anbefalinger til hvordan det skal/kan anvendes. Generelt er der mange steder hvor man kan finde tutorials på hvordan man kommer nemt i gang. I arbejdet med at bygge denne tvilling fandt vi at;

- Det er nemt at komme i gang og forstå demo eksempler
- Vi havde svært ved at gå trinvis frem – det vare mere big bang og hvis ikke det virkede så kunne vi ikke gennemskue "mellemregningerne". AI metoderne er af natur lidt black-box agtige – og når man er ny indenfor AI-teknologierne er det svært at navigere når ikke det går godt i første omgang.
- Vores baggrunde var mangelfulde, et gammelt phd i matematisk modellering baseret på en deterministisk model og en nyere ingeniøruddannelse i maskinteknik, samt kandidatkurser indenfor området. AI er ikke blot en lille udvidelse. Vi mangler et andet/yderligere fundament for at kunne forstå og anvende teknologierne.

Vi måtte stoppe arbejde med tvilling A grundet ressource – og kompetencemangel. Hvis arbejdet ønskes, genoptages må der forventes afsat ressourcer også til kompetenceopbygning.

Konklusionen på spørgsmålet om sværhedsgraden er derfor;

*Det at opbygge en digital tvilling der kan lave præcise opgørelser af dels det realiserede og dels det mest optimale styringsscenarie er muligt og udfordringerne er typisk relateret til datafangst.*

*Det at opbygge en AI baseret digital tvilling der med baggrund i prognose data kan foreslå det bedste styringsscenarie, a) overstiger vores kompetenceniveau og b) de mere fundamentale AI-metoder har deres egent videns- og metodefundament.*

De traditionelle deterministiske og statistiske modeller gør det muligt at følge mellemregningerne og se en direkte to-vejs sammenhæng mellem data og parameter input og modellens output. Det gør det muligt ved nye problemstillinger at genanvende meget viden og erfaring.

Ved anvendelsen af AI metoder er det ikke nødvendigvis muligt at gennemskue sammenhængen mellem input og output, og output baseret på uændret input vil ændre sig i takt med at modellen bliver oplært. Oplæringen indlejres i modellen og kan være svær at trække ud gennemskue.

Så AI er et nyt værktøj i en ny værktøjskasse.

## **SAMARBEJDSPARTNERE OG INTERESSENER**

Projektet har været fulgt og til dels inddraget flere partnere.

Sinding & Co ejer bygningen som solcelleanlægget sidder på og dermed solcelleanlægget. Aarhus Maskinmesterskole, som lejere af bygningen, har indgået en aftale hvis hovedbestanddele betyder at vi betaler af på investeringen og afholder driftsudgifter mod at få hele indtægten fra driften. Sinding & Co har vist en løbende interesse i selve økonomien men også den læring vi havde i forbindelse med de mange installationsrelaterede

opstartsproblemer vi slåsede med i starten af projektet. Projektet indikerer at det giver mening at få kortlagt den realiserede økonomi så det kan indgå i overvejelser om fremtidige investeringer.

Visblue udvikler og producerer flow-celle batterier. De har været interesseret i vores beregninger i forhold til indtjening på batteridelen. Teknologien har sin styrkeposition på andre ting end økonomien så ikke alene på den parameter en konkurrent til lithiumbatterierne der er den mest anvendte teknologi. En generel afdækning af at der ikke er styr på solcellerne i Danmark er ikke nødvendigvis i deres interesse.

Evishine udvikler og leverer overvågningsløsninger til solcelleanlæg. Deres produkter er typisk beregnet til når man har investeret i solcelleanlægget. Produktet viser blandt andet relevante driftsdata, herunder aktuel indtjening. Produktet beregner ikke hvad man kunne have tjent eller sammenligner med den situation at man ikke havde investeret i solceller.

Aarhus Kommune har investeret i en række solcelleanlæg. De gør det i regi af deres eget selskab. Den teknisk ansvarlig fra Aarhus Kommune har vist interesse for vores projekt. Aarhus kommune laver ikke beregninger af deres energiudgifter uden anlæg – og fokusere deres kræfter på nye anlæg og optimeret drift af de eksisterende.

## **OBSERVATIONER**

Observationerne er opnået i løbet af projektet, de er ikke baseret på specifikke udvalgte dataindsamlingsmetoder og kan derfor ikke som sådan verificeres.

Vi undersøgte om andre solcelleejere havde lavet tilsvarende beregninger og kunne ikke finde eksempler på dette. Tilsvarende undersøgte vi om forskellige kommercielle datahotelløsninger til

solcelleanlæg tilbød sådanne beregninger også uden at finde eksempler på dette. Vi har ikke viden om hvorfor solcelleejere og datahotelløsningsudbydere ikke ønsker at lave en reel beregning af afkastet af deres investering, herunder at sammenligne det med en situation hvor de ikke havde købt anlægget. Det er udenfor projektets ramme at spekulere i dette.

Da vi ikke kunne anvende eksisterende løsninger eller finde eksempler på tilsvarende beregninger, kiggede vi på om det var et generelt problem. Vi fandt at de ca. 80.000 små og mellemstore solcelleanlæg produktionsmæssigt ikke styrede efter et prissignal. I situationer hvor el-prisen er negativ og man straffes for at producere ud på nettet lukke de helt store anlæg ned, men de små og mellemstore fortsætter uændret. Det er ikke et endegyldigt bevis for at alle anlæg kører økonomisk uhensigtsmæssigt men det er en klar indikator for at mange gør. Relevansen af projektets artefakt synes derfor argumenteret.

I arbejdet med selve solcelleanlægget fandt vi at

- Der er en meget styret og kontrolleret proces omkring den tekniske installation af solcelleanlægget og den del af softwaren der sikrer en ind- og udkobling af anlægget. Der er inddragelse af Nrgi, der er ansvarlig for den tekniske forsyning af bygningen og tilhørende afregningsmåler.
- Der er ingen retningslinjer for den del af softwaren som styrer den strategiske drift af anlægget. Vi har været i dialog med 4-5 solcelle integratorer for at høre om de følger nogle retningslinjer det synes ikke at være tilfældet.
- Cybersikkerhedsmæssigt er det ren wild-west tilstande. Der installeres løsninger der kan styre anlægget, også ændre på de parametre der er forbundet med el-teknisk sikkerhed, uden omtanke for cybersikkerhed. Dette synes udbredt.
- Software til strategisk styring af anlæggene

- tager ikke altid hensyn til det danske elmarked
- har ikke nødvendigvis indbygget nogen cybersikkerhed
- viser opnåede økonomiske og co2 reduktions opgørelser der er baseret på antagelser og ikke realiserede værdier
- Installatørerne har ikke nødvendigvis viden om dette, eller finder det relevant at arbejde med.

## PROJEKTETS EFTERLIV

Vi har været i dialog med Energinet, DTU, FB-gruppen Solceller i Danmark samt elforbrug.nu.

Energinet erkender at solcelleproduktionen på de mange mindre anlæg ikke synes at være styret af et markedssignal. De mener det udgør et problem, men har ikke vist interesse for at gå videre.

Vi har kontaktet DTU's energiforskere som har fundet at solcelle problemstillingen ikke var relevant for det de arbejdede med. Projektets tankegang om en tvilling B til løbende test af tvilling A er interessant for dem og der er indledt en dialog med Energy Cluster, DTU og to danske virksomheder der arbejder med teknologier, hydrogen og methanol fremstilling, hvor en tilpasning til energisystemet er nødvendig. Arbejdsdelingen er at DTU arbejder med tvilling A og AAMS med tvilling B. Der arbejdes mod en FoU ansøgning i efteråret 2025. Der er også indledt en første kontakt der omhandler selve solcelleproblemstillingen, resultatet af dette kendes ikke i skrivende stund.

Vi har fremstillet seks videoer omkring afregning af solcelleanlæg og fortalt om den på en Facebook gruppe – Solceller i Danmark. Der har været ca. 120 visninger – så ikke en udelt succes.

Vi har være i dialog med elforbrug.nu. Det er en hobbydrevet hjemmesiden med en stor følgegruppe og en kvalificeret



moderator. Det kan være her at projektets solcelle vinkel måske har den største mulighed for et efterliv.

Vores arbejde med platformen Node Red har medført at vi nu undersøger mulighederne for at lave efter/videreuddannelses aktiviteter på dette område i samarbejde med SESAM.

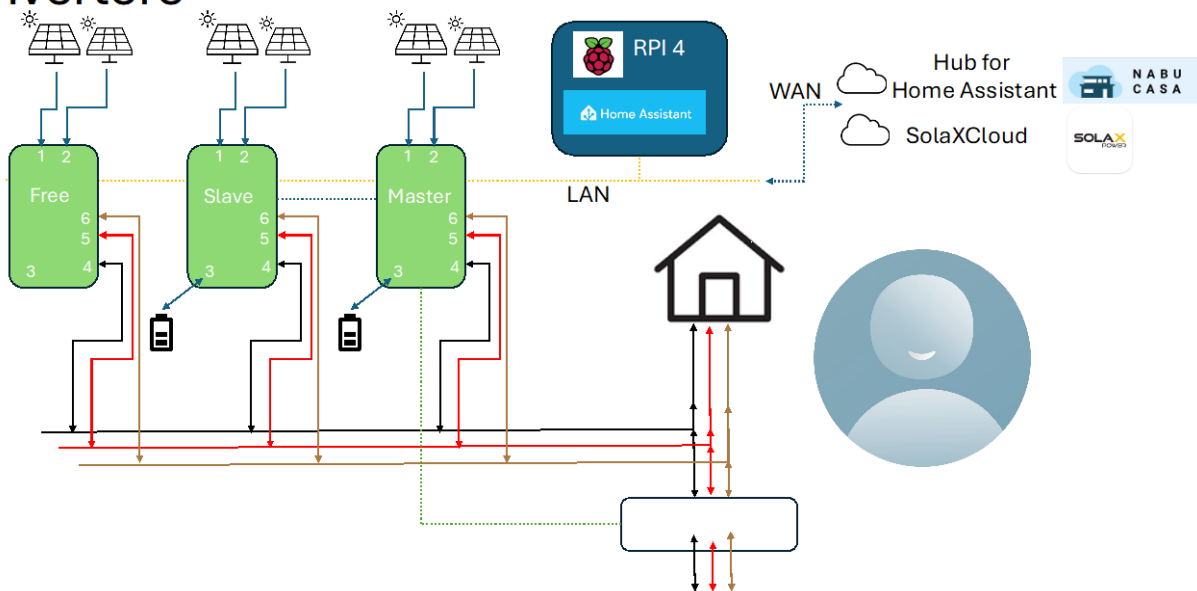
# BILAG

## INSTALLATIONEN PÅ MEJLGADE

Anlægget befinder sig på Mejlgade 39A, 8000 Aarhus C. Der er indsat forskellige oversigtstegninger nedenstående. Anlægget er ejet af Sinding og Co. AAMS har fuld teknisk og økonomisk råderet over anlægget. Der er seks sæt af solpaneler, hvor de parvis er tilsluttet tre invertere. Til to af inverterne er tilsluttet batterier.

I tilknytning til anlægget er opstillet en lille computer, RPI4, hvorpå der er installeret Home Assistant (HA). HA er et free-ware der er alment benyttet af professionelle og private til styring af blandt andet energianlæg, men også mange andre installationer i hjemmet. For at tilgå anlægget fra fjern har vi tilkøbt en lille ydelse på nettet, Nabu Casa, som giver sikker fjernadgang.

### Solcelle anlægget med tre 10 kW Solax invertere

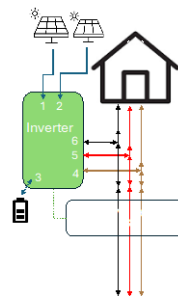


## DATASTRØMME

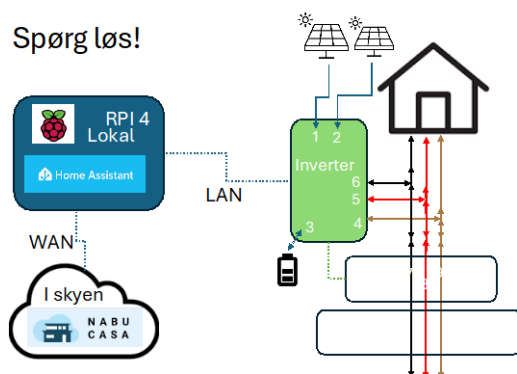
I Home Assistant (HA) er der kontakt til anlæggets tre invertere. Der benyttes sammentællinger af dagens energistrømme. Husets forbrug måles/beregnes indirekte ved hjælp af automatiseringscripts vi selv har opbygger i HA. Det gøres ved sammenligne 4+5+6 med 7+8+9, forskellen mellem energistrømmene er den energistrøm der tilgår huset. Vi har tilsvarende installeret et modul til at kommunikere med DataHub – Energinet's udstillingsplatform for energidata, herunder timepriser og associeret CO2 udledning. Det er således muligt at lave økonomiske beregninger ud fra realiserede energistrømme kombineret med aktuelle timevarierende priser.

### Data fra energistrømme kWh

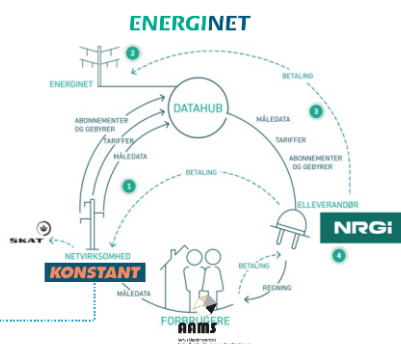
Måling	Punkt	Inverter	HA Entity ID nu tilfås hver midnat Minutværdier kWh på mgtt://142.93.135.2:1883 /Maj/gade/SolcelleData
Dagens solproduktion	1+2	Master	sensor.solax2_batt_today_s_solar_energy
Dagens energi til batteri	3	Master	sensor.solax2_batt_battery_input_energy_today
Dagens Energi fra batteri	3	Master	sensor.solax2_batt_battery_output_energy_today
Dagens energi fra grid	7+8+9	Master	sensor.solax2_batt_today_s_import_energy
Dagens energi til grid	7+8+9	Master	sensor.solax2_batt_today_s_export_energy
Dagens solproduktion	1+2	Slave	sensor.solax_slave_today_s_solar_energy
Dagens energi til batteri	3	Slave	sensor.solax_slave_battery_input_energy_today
Dagens Energi fra batteri	3	Slave	sensor.solax_slave_battery_output_energy_today
Dagens solproduktion	1+2	Free	sensor.solax_today_s_solar_energy



### Spørg løs!



... Energistrømme (W) og spænding (V) opsamles og akkumuleres (kWh) af inverter summeret og aktuelt forbrug kan aflæses på skærm historiske forbrugsdata fra , priser og emmissioner på time niveau kan hentes 1-2 dage forsinket historiske forbrugsdata fra og faktura på kvartalsniveau kan hentes



- 1 Netvirksomheden indsender måledata, tariffer og andre priselementer til DataHub.
- 2 Energinet indsender TSO-tarifferne samt satser for elafgift til DataHub.
- 3 DataHub sender løbende måledata samt tariffer og afgifter for hvert målepunkt til elleverandøren. Elleverandøren modtager kun data for egne målepunkter.
- 4 Elleverandøren laver én samlet regning til kunde



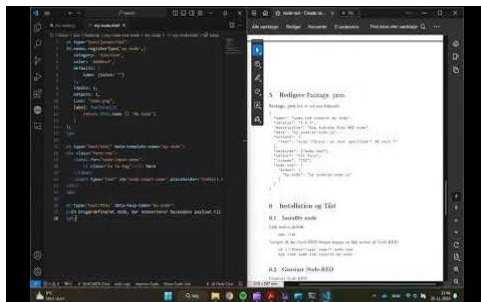
## DIY-OPSKRIFT TIL NODE RED MODULER

Der er udarbejdet en opskrift til hvordan man kan lave egne nodes til programmet Node Red. Materialet er tilgængeligt i form af en PDF og en You-Tube video.

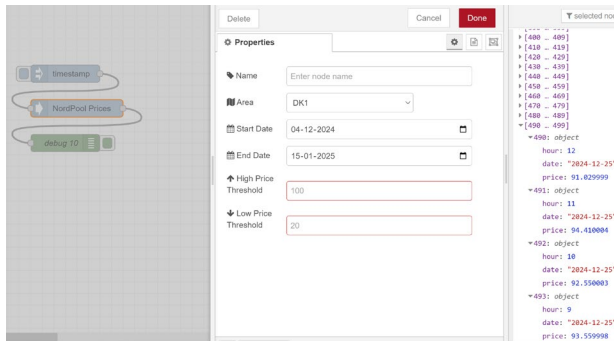
<https://www.youtube.com/watch?v=HtEUTUw2Hf0>

### Node-red DIY nodes

- Udarbejdet materiale til at lave egne nodes
  - PDF
  - [YouTube](#)



### Nordpool Prices node



## Udfordringer ved at lave en længere forecast af elspotpriser

For at kunne udvikle en digital tvilling, der kan simulere forskellige scenarier for opladning af en batteripakke og optimere køb og salg af elektricitet, er det nødvendigt at lave en præcis prognose for elspotpriserne.

Elspotpriser fastsættes på NordPool, den fælles elbørs for Norden og Baltikum. Hver dag kl. 13:00 offentliggør Nord Pool en prognose, der dækker de næste 24 timer. Disse priser danner grundlaget for elhandelsselskabernes fastsættelse af variable detailpriser.

En længere prognose end 24 timer ville gøre det muligt at planlægge drift og vedligeholdelse af batteripakken mere effektivt. Dog er det udfordrende at lave en længere forecast, da elspotpriserne påvirkes af en række faktorer, herunder vejrforhold, brændselspriser, vedligeholdelse og nedlukninger af kraftværker, forbrugsmønstre samt udviklingen på internationale energimarkeder.

Flere modeller er blevet afprøvet for at forbedre prognoserne. ARIMA og SARIMA er velegnede til tidsserieprognoser, mens metoder som lineær regression og Random Forest også er testet. Dog har sidstnævnte metoder generelt svært ved at fange sæsonvariationer og trendsift, hvilket begrænser deres præcision ved længere tidsforudsigelser.

## **FORMIDLING AF RESULTATER**

Projektet er omtalt på EAAS og AAMS projekthjemmesider.

<https://www.eaaa.dk/forskning-og-innovation/projekter/aktuelle-forskningsprojekter/digital-tvilling-til-optimering-af-batteridrift/>

<https://blue-future.dk/groen-og-oekonomisk-drift-af-batteripakker-til-solcelleanlaeg/>