

# Solceller til Elproduktion

Funktion, elementer, og hvordan de fungerer

Finn Kraemer – September 2022

# Forbehold

Information i denne note er baseret på et specifikt system og er muligvis ikke generelt anvendelig.

Markedsforhold så vel som lovgivning og afgifter relateret til vedvarende energi ændres ofte. Derfor kan specifik information, links, og tal være ændret siden denne note blev skrevet.

Omkostninger til materialer og installationsarbejde kan være øget siden eksemplerne i denne note blev etableret. Fremskaf altid aktuelle tilbud med besøg på stedet når der laves projektplaner.

Brug af data og anden information i denne note til et hvilket som helst formål er læserens ansvar.

Finn Kraemer, Ph.D., September 2022

## Hvad drejer dette sig om?

- Brug solenergi i dag timerne til at drive elektriske apparater når du har brug for det og til opladning af et batteri til brug om natten.

Solen leverer ca.  $1367 \text{ W}^*$  per  $\text{m}^2$  vinkelret på strålerne hvis der ikke var nogen dæmpning i atmosfæren.

Moderne PV (Photo Voltaic) solceller kan indfange ca. 25% af denne energi og omdanne den til elektricitet.

Hvordan? – Solceller (PV celler) består af en sandwich af grundstoffer lavet sådan at de kraftfulde fotoner fra solen sparker elektronerne i stoffet op i et højenerginiveau hvilket ses som en spænding på ca. 0.7 V over hver celle.

Cellerne er forbundet i serie i hvert panel så spændingen 'stakkes op' til 15 – 30 V som vi kan bruge til at oplade batterier, drive lamper mm.

\* <https://da.wikipedia.org/wiki/Solarkonstanten>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell)



Solcellerne svarer til pumpen i et vandkredsløb og ledningerne til slangen.

## Det elektriske kredsløb

- Elektriske kredsløb forstås bedst ved sammenligning med et vandingsystem. Solcellerne, generatoren, fungerer som en pumpe, hvor trykket er spændingen og vandstrømmen er den elektriske strøm.
- Når der ikke er noget forbundet til pumpen/solcellerne, står de blot med det tryk/den spænding, som man kan måle med et voltmeter. Dette er åben-kreds spændingen, normal 25 – 30 V for et panel. Ingen fare ved at røre ved ledningerne.
- For at udnytte energien må man tilslutte ledninger ligesom man forbinder slanger til en vandpumpe som skal drive et springvand.
- Jo tykkere slanger/ledninger jo mindre tab, jo mere vand/strøm til springvandet/elapparaterne.
- Forskellige pærer har forskellig modstand. Jo lavere modstand, jo højere strøm løber der gennem pæren, jo mere lyser den.
- Et solpanel opfører sig også ligesom en vandpumpe, når man belaster det. Spændingen fra panelet falder ligesom trykket fra pumpen, når man belaster den.
- Dvs. for et solpanel er der en optimal værdi af den strøm man kan 'hive' ud af det for at få størst effekt. Denne kombination af spænding og strøm kaldes MPP = Maximum Power Point.
- Et apparat, som automatisk tilpasser belastningen løbende, kaldes en MPPT tracker. Vi gemmer matematikken til senere.

## Net-tilsluttet eller ej (Ø-drift)?

- Solcelleanlæg kan tilsluttes det offentlige elnet, eller de kan køre alene. Hver løsning har sine fordele.
- Nettilsluttede systemer kræver invertere for at omdanne jævnspændingen fra solpanelerne til vekselspænding på nettet.

Net-forbundet	Ø-drift (stand-alone system)
Invertere er nøglekomponenter i et netforbundet anlæg.	Kræver ingen invertere. Kun MPPT regulator.
Nogle net-forbundne systemer fungerer ikke, hvis der er strømafbrydelse.	Uafhængig af lysnettet.
Man kan sælge overskydende el, når batteriet er opladet.	Ingen højspændingskomponenter.
Microinvertere, en for hvert panel sikrer maximum produktion fra hvert panel uafhængigt af øvrige paneler.	Panels are usually connected in parallel or a combination of parallel and series with some interdependency.
Net-spændings udgang – standard elpærer mm. kan bruges.	Kræver lavspændings-pærer på et separat ledningsnet i huset.
	Lavspændings-apparater, f.eks. routere, satellimodtagere og andre 12 eller 24 V apparater kan forbindes direkte.

# Ikke-net-tilsluttet System (Ø-drift)

- De følgende sider viser strukturen af et ikke-nettilsluttet system med forsynings- og forbrugssiden.
- Hjertet i denne type system er kontrolenheden, som styrer al konvertering mellem solpaneler, batteri, og belastning. Kontrolenheden har kortslutningssikring som beskytter den hvis udgangen ved et uheld skulle blive kortsluttet, f.eks. under installation af ledninger til lamper og apparater.
- De fleste kontrolenheder skifter automatisk mellem 12 og 24 V svarende til batteriets spænding.
- I systemer uden net-tilslutning kan man ikke sælge overskydende elektricitet. Man må derfor omhyggeligt tilpasse batteristørrelsen til de ting man tilslutter, forbrugsmønstret og solpanelkapaciteten, så man får mest muligt ud af investeringen.

## Produktion, batteri og styring

Solar Panels



Charge Controller



Batterier – 12V

24V er en mulighed, men de fleste lamps m.v. er beregnet til 12V.

Solpanelerne oplader batterierne i løbet af dagen. Batterierne leverer energi til at drive belastningerne (lamper, TV, elektronik m.v.) om natten.

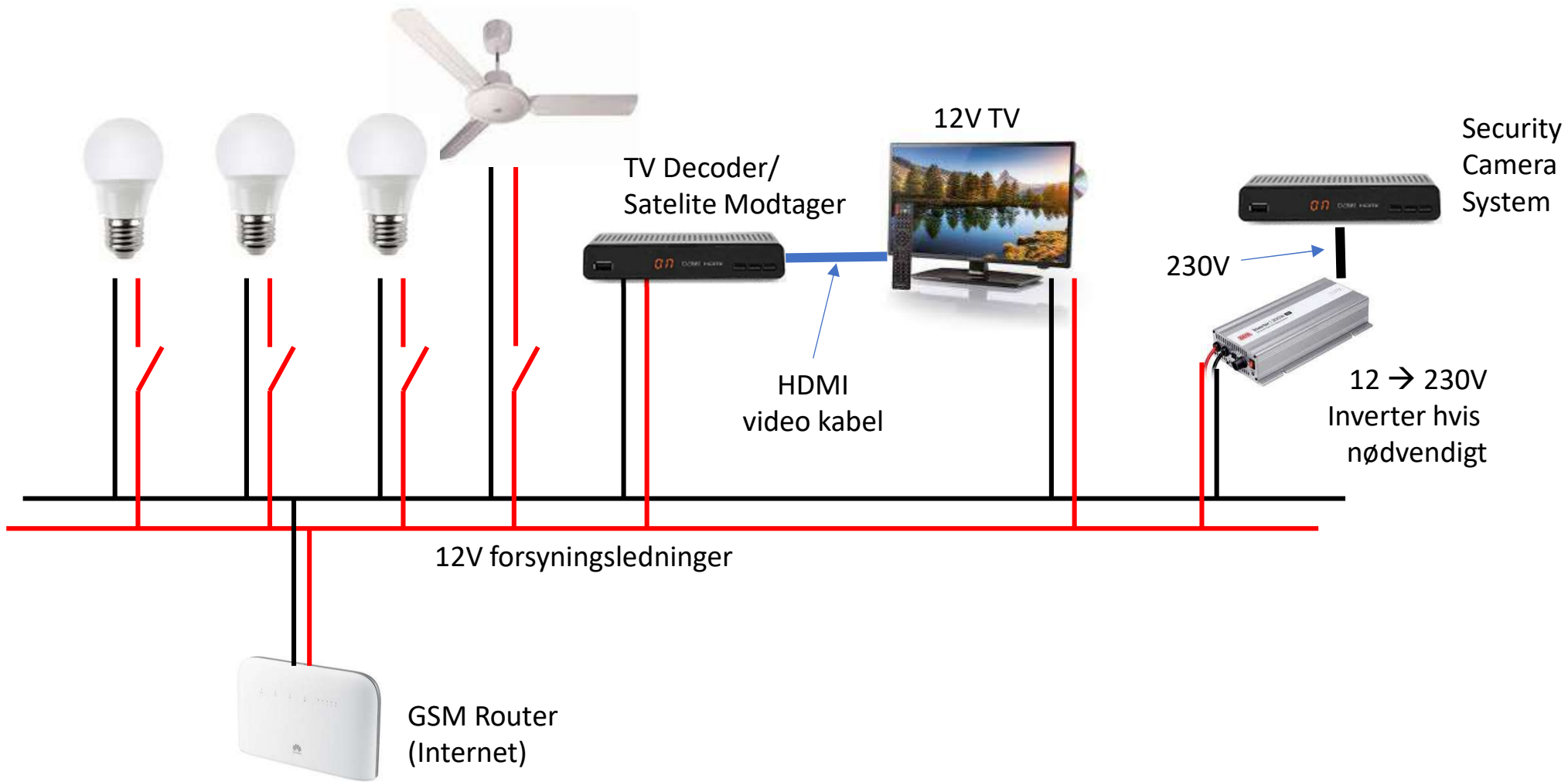
Kontrolenheden sikrer at batterierne ikke bliver op- eller afladet for meget, da begge dele kan beskadige dem. Bilbatterier kan ikke anvendes, da de ikke er beregnet til at blive fuldt af/og opladet til daglig.

Blybatterier skal f.eks. kobles fra, hvis spændingen kommer under 11.2 V.

12 V forsyningsledninger til lamper, TV m.v.

Sol-drevet husholdning

# Lamper og apparater



# Solpanelerne – placering og vedligeholdelse

Solpanelerne er specificeret til den spidseffekt de producerer med sollys vinkelret ind på panelet.

Solhøjden ændres over dagen og panelernes ydelse ændres med solhøjden gennem dagen.

$$P_{\text{out}} = \sin(v) \times P_{\text{max}}$$

hvor  $P_{\text{max}}$  er den specificerede max effekt fra et panel, f.eks. 370 W.

Vinklen  $v$  er vinklen mellem panelet og indstrålingen.

Vinklen afhænger af både stedets bredde, tidspunktet på dagen, årstiden, og panelernes hældning (elevation).

Bemærk at man aldrig når den fulde specificerede ydelse hvis elevationen er under den maksimale solhøjde på stedet.



**Snavs og støv** på solpanelerne reducerer deres effektivitet. Placer aldrig panelerne vandret, også selv om det giver højest ydelse for et anlæg ved ækvator.

Giv panelerne mindst 15 graders hældning og regnen vil fjerne det meste af snavset. Man skal dog stadig vaske panelerne årligt.

## Hvor meget effekt og energi til forskellige apparater?

Apparat	Effekt (W)	Energi (kWh)
Telefon-oplader	5-7	0.005 per opladning
Internet router	5	0.1 /24 h
LED pære	1 – 10	0.03 – 0.3/24 h
Projektør (udendørs)	10 – 50	0.01 – 0.05/h
Printer (when printing)	20 (jetink), 100 (laser)	< 0.1/h
PC (active)	70 – 200 incl. monitor	< 0.2/h
Køleskab 150l class A+++	60	~ 105 kWh/år
Fryser 200l class A+++	100	~ 220 kWh/år
Strygejern	350 – 700	< 0.7/hour
Opvasker*	1000 – 2000	1 – 2 per vask
Vaskemaskine*	1000 – 3000	1.5 – 4 per vask
Tørretumbler*	1000 – 2000	1 – 3 per cycle
Bilopladning**	2200 – 13000	10 – 80 per fuld opladning (fra tom)

\* Afhænger af program og tilstand. Max effect i opvarmning/tørring processerne.

\*\* afhænger af type og model.

Køl & Fryser skal holdes afrimet for at opnå mindst energiforbrug.

## Apparaterne

TV'et trækker måske en kraftig strøm lige når man tænder for det og kræver måske en direkte forbindelse til batteriet for at tænde. Dvs. et batteri kan blive nødvendigt tæt ved TV'et for at levere nok start-strøm. (12 V TV).

En fryser med 12V forbindelse kan tilsluttes 12V forsyningsledningerne. Den bør ikke tilsluttes direkte til batteriet, da den ellers kan aflade batteriet for meget. Brug udgangen fra styre-enheden.

Apparater med 12V forbindelse fås i mange forretninger med udstyr til camping og både.

## Styreenheden i anlæg uden lysnet-forbindelse

Styreenheder har forekkelig farve og udseende afhængig af type og fabrikat. **MPPT (Maximum Power Point) enheder** er de mest effektive. Andre er PWM (pulse-width modulation) typer, billigere, men mindre effektive.



Nogle enheder har USB udgange til f.eks opladning af mobiltelefoner.



De mest avancerede (og dyreste) enheder, f.eks. Victron, har blue tooth interface og mobil telefon App til styring og monitorering.

## Net-forbundne anlæg: Hvad er en mikroinverter?

Inverteren er det apparat, som omdanner jævnspænding fra solarpanelerne til 230VAC netspænding. Derved kan man forbinde solpanelerne til lysnettet.

En mikroinverter er en lille inverter, som konverterer spændingen fra et enkelt solpanel til 230VAC.

Et anlæg med mikroinvertere har en mikroinverter forbundet til hvert solpanel. Det betyder at udnyttelsen af solenergien fra et panel er uafhængig af de øvrige paneler i anlægget.

Dette muliggør

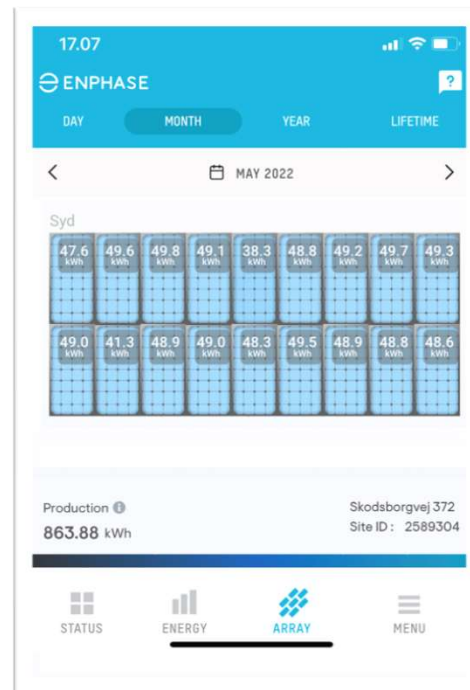
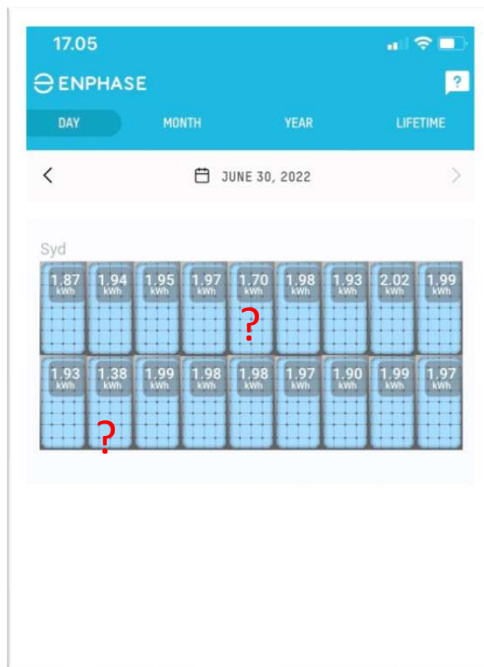
- optimal udnyttelse af hvert panel og dermed hele systemet
- Monitoring af status og ydelse af hvert enkelt panel. Dette er specielt nyttigt for reparation af skader, som man måske ellers ikke opdager.
- Intet single point of failure i større anlæg
- Højere pålidelighed af inverter funktionen

En mikroinverter håndterer effekten fra et enkelt panel hvilket betyder at varmen og dermed temperaturstigningen er mindre end i et anlæg med en enkelt central inverter. Man får dermed højere pålidelighed /længere levetid af inverterne på trods af det større antal.

Mikroinverter (Eksempel)



# Overvågning af anlæggets ydelse



Anlæggets ydelse kan overvåges med en App til mobiltelefoner, eller på den modsvarende web side.

I dette eksempel producerer panel #5 (I øverste række) og #2 i nederste række mindre end de øvrige og bør checkes. Er det panelerne eller inverterne?

App'en viser ydelse per dag, måned, år og for den samlede levetid.

Anlægget kræver internet forbindelse for at få overvågningen til at virke. Data uploades periodisk til Enphase's web server, hvor man logger ind for at se det.

# Batteriet



Batteriet er den centrale enhed i både net-forbundne og ikke-netforbundne solcelleanlæg.

Det lagrer den opsamlede energi indtil man har brug for den. Produktion og forbrug falder sjældent sammen. Ikke-netforbundne anlæg opsamler energi om dagen og bruger den til belysning og andet om aftenen.

Hvor mange solskinstimer har din location i gennemsnit? Hvor meget ændrer det sig gennem året? Husk at når der er skyet producerer panelerne kun omkring 10% af maksimum ydelsen ved fuld sol.

Net-forbundne anlæg sælger automatisk overskudsproduktion, mens ikke-netforbundne anlæg ikke kan bruge et evt. overskud.

Batteri kapacitet måles i Ampere-timer (Ah), f.eks. 100 Ah. Energimængden er lig med kapaciteten i Ah x batterispændingen. Eksempel:

$$E = 12 \text{ V} \times 100 \text{ Ah} = 1200 \text{ Wh} = 1,2 \text{ kWh.}$$

Energi regnes i Joule (J) hvor  $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$ . Idet  $1 \text{ h} = 1 \text{ time} = 3600 \text{ s}$ , er 1,2 kWh lig med  $4320 \text{ kJ} = 4,32 \text{ MJ}^*$ .

Man kan imidlertid ikke anvende den fulde batteri kapacitet, men må lade ca. 10% af ladningen blive tilbage for at undgå beskadigelse af batteriet. Styreenheden sørger automatisk for dette, når batteritypen er indstillet korrekt.

\* Til sammenligning er 1 liter benzin ca. 36 MJ, men motorer udnytter kun 30% af energien mens elmotorer udnytter 95% af batteriets energi.

# Batterier til net-forbundne anlæg



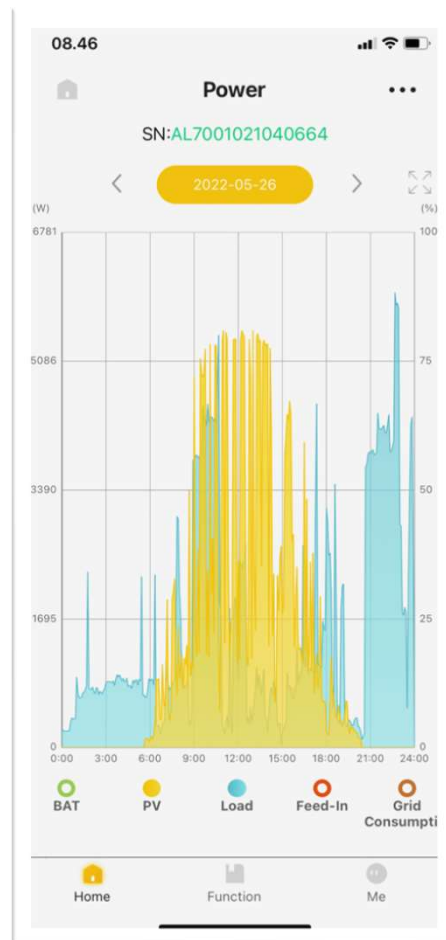
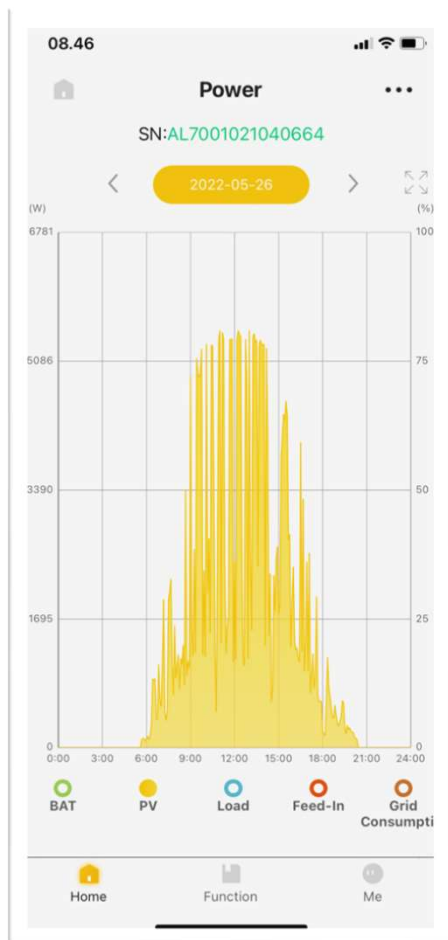
Net-forbundne anlæg har stor fordel i at have et batteri installeret – ligesom de ikke-netforbundne systemer.

I begge typer anlæg giver et batteri mulighed for at bruge energien på et andet tidspunkt end når den produceres. Der er ofte stor prisforskel mellem købs- og salgsprisen for elektricitet, så den største værdi i selv-produceret elektricitet er at man sparer indkøb af samme mængde elektricitet fra nettet.

## Net-forbundet batteri (Eksempel)

Hovedenheden med indbygget styring har 3 kWh batterikapacitet. Hvert udvidelsesmodul tilføjer yderligere 3 kWh kapacitet. Dvs. det viste batteri har en samlet kapacitet på 9 kWh.

# Driftsstatistik

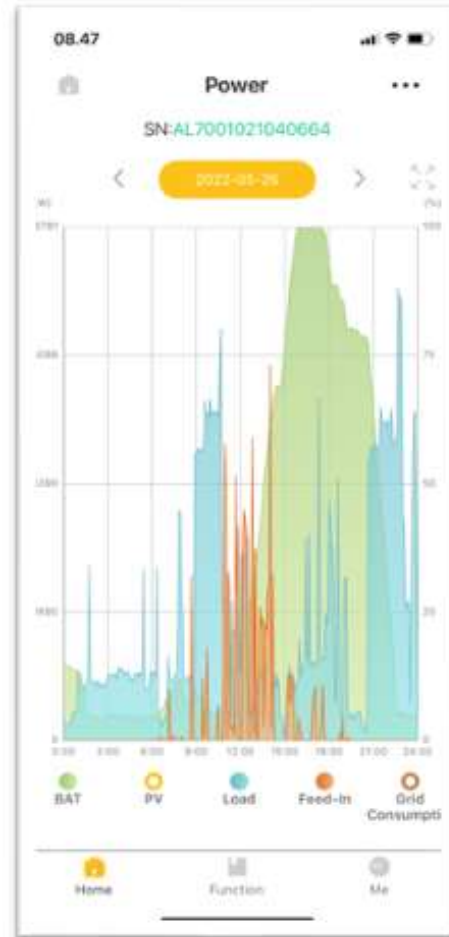
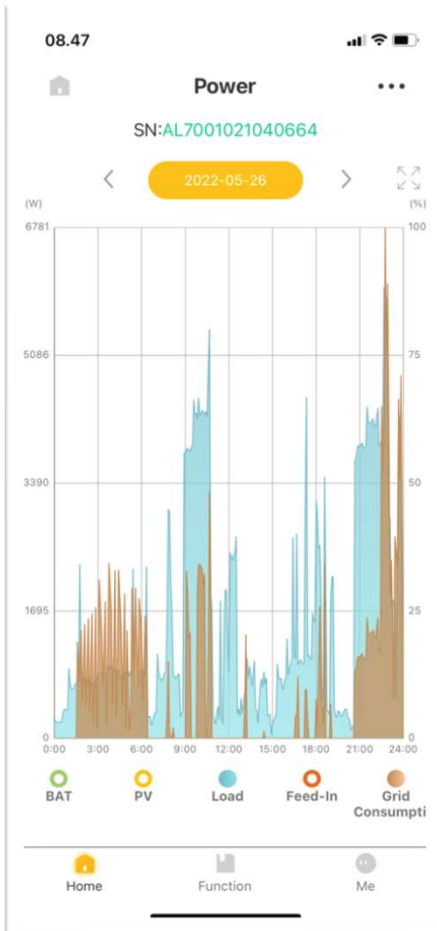


Batteri systemer giver mulighed for overvågning af produktion, forbrug og selvforsyningsgrad. Graferne er et eksempel på et 6 kW anlæg installeret i Danmark med statistik fra 26. maj 2022.

Venstre figur viser hvordan produktionen varierer over a denne halv-skyede dag. Den blå kurve i den højre figur er forbruget med variationer, som skyldes brug af vaskemaskine, og – mod slutningen af dagen – opvaskemaskine og ladestander til bilen.

Batteriet har sin egen indbyggede styring, som er tilsluttet internettet, så den kan uploade alle data til leverandørens internet-server. Man logger ind på leverandørens webside eller bruger mobiltelefon-App'en til at se sine data.

## Driftsstatistik (2)



Andre statistikker fra samme dag viser indkøbt el fra nettet (**brun**) og salg 'Feed-in' til nettet (**rød**). Den grønne graf er batteriets lade-status (højre sides Y-akse).

Man ser at batteriet var fuldt opladet kl. 15.30.

Strategien er generelt:

1. Dæk eget forbrug = belastningen
2. Lad batteriet op
3. Sælge el, når batteriet er fuldt opladet.

Hvis produktion minus belastningen overstiger batteriets maksimale lade-effekt (her ca. 3 kW), så bliver overskuddet også solgt. Det er grunden til at der sælges el i eksemplet, inden batteriet er fuldt opladet.

Den høje belastning om aftenen i eksemplet tømmer batteriet inden midnat.

# Statistik og økonomi

Vores 6.1 kWp anlæg med 30 graders elevation, og som vender mod syd, producerede 5400 kWh i perioden januar - august 2022, hvilket giver en estimeret **årsproduktion på ca. 7300 kWh** for 2022 hvis de sidste måneder følger statistikken som de første 6. Af produktionen forventes ca. **2000 kWh solgt til nettet.**

## Eksempel:

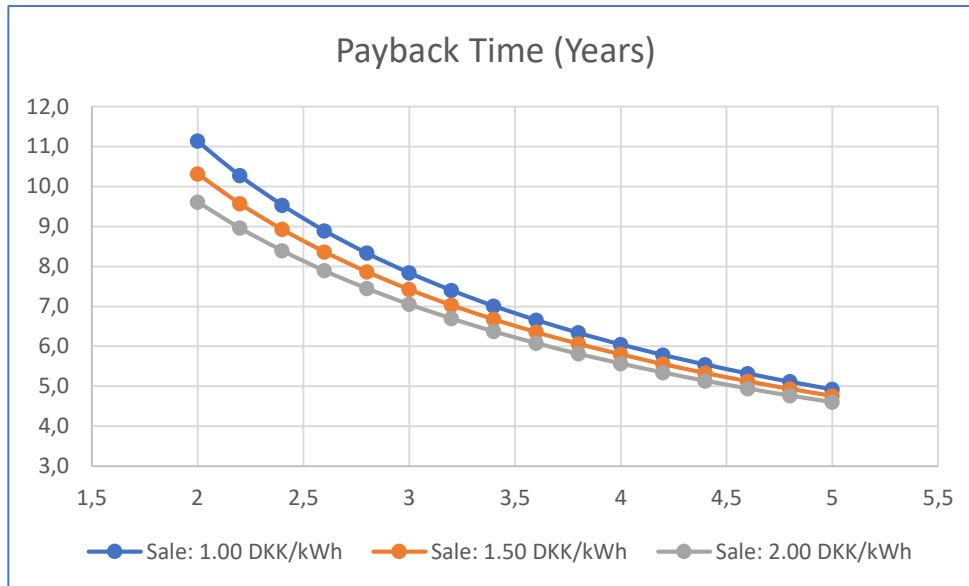
Med en gennemsnitspris på DKK 3.30/kWh og egen udnyttelse af of 7300 – 2000 = 5300 får man en besparelse på ~DKK 17,500 inkl. moms.

Omkostninger inkl. installation:	DKK 140,300
Årlig besparelse:	DKK 17,500
<b>Tilbagebetalingstid (0% rente)</b>	<b>8 år</b>

Tilbagebetalingstiden er faktisk kortere hvis man medregner indtægten fra solgt energi. Prisen for denne er variabel. kWh prisen i maj var i gennemsnit DKK 1,05 (exkl. moms). Hvis man antager at denne er gennemsnitsprisen for hele året, øges indtjeningen til 19.600 og

**tilbagebetalingstiden reduceres til 7,1 år.**

# Tilbagebetalingstiden afhænger af kWh prisen

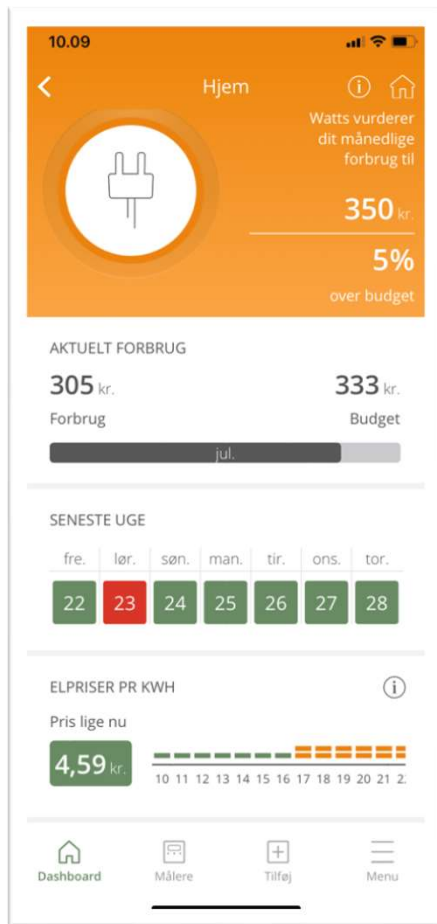


Grafen viser hvordan tilbagebetalingstiden falder med stigende kWh pris.

En mindre del af energien sælges og indtægten fra dette bidrager til yderligere reduktion af tilbagebetalingstiden.

For at beregne tilbagebetalingstiden har man brug for elprisen. Hvor får man den fra?

## Følg med i elprisen per kWh (Danmark)



Watts app'en til smartphones viser elprisen for din adresse time for time. Den udnytter at alle husstande i Danmark har fjernaflæste elmålere. Elselskaberne aflæser forbruget og lagrer data i en central database hvor Watts kan aflæse din husholdnings forbrug pr time, dag, måned og år.

App'en er let at bruge og hvis man ruller lidt ned, ser man den aktuelle pris + prisen en dag fremad og tilbage. Tallene viser prisen **inkl. transport, afgift og moms**. Grafen viser betydelige variationer over døgnet.

Man kan spare penge ved at planlægge hvornår man bruger elektricitet.

Watts kræver blot aftager- og installationsnummer til registrering. Når registreringen er gjort, kan man se sine data efter et par timer.

# Statistik og Økonomi

Relativ (%) fordeling af solcelleproduktion gennem året for Danmark.

For den nordlige halvkugle er den optimal retning at panelerne peger mod syd.

Hvis dette ikke er praktisk muligt, kan man se fra grafen til højre, hvor meget produktionen reduceres ved at montere panelerne på en østvendt (blå) eller vestvendt (green) tagflade.

Referencer:

<https://slideplayer.dk/slide/1974587/>

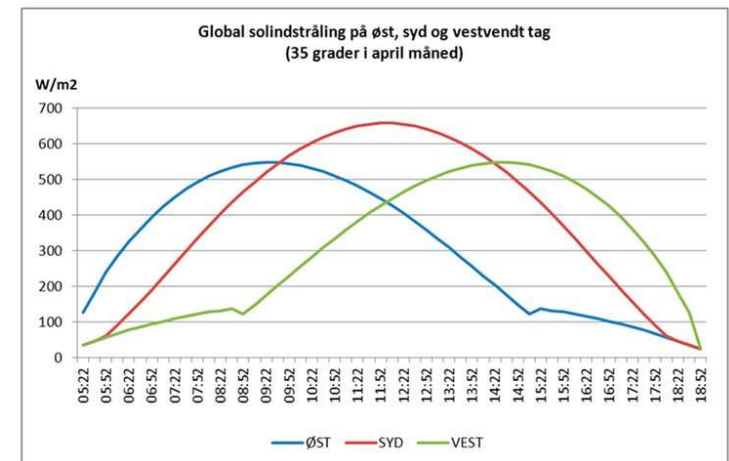
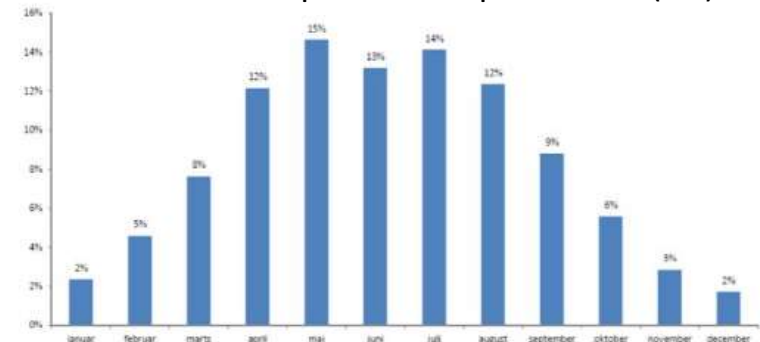
<https://byggeri-teknik.dk/solceller-til-daekning-af-boligens-elforbrug/>

<https://www.bolius.dk/faa-stoerst-udbytte-af-dine-solceller-5044>

Generelle referencer:

<https://www.greenmatch.dk/solceller>

Solar Cell production per month (DK)



# Roterende/vippende solpanels



Man kan øge solcelleproduktionen ved at dreje panelerne så de sporer retningen mod solen og vippe dem, så de passer til solhøjden.

Sådanne systemer bliver imidlertid let beskadiget af uvejr og stærk blæst og er ikke udbredt i forblæste områder.

Flere ejendomme – én økonomi

Hvis man har flere ejendomme (huse, bygninger) er der en anden mulighed for at øge produktionen ved at installere solpanelerne hvor der er størst antal solskinstimer, og bruge elektriciteten på andre steder.

Dette kræver imidlertid at alle lokationer er forbundet til elnettet, og at lovgivningen bliver ændret, så elselskaberne kan betragte flere lokationer som et samlet system. Det må de ikke med den nuværende lovgivning.

# Document history

Rev.	Date	Changes
01	Oct 2020	Initial rev, offgrid system
02	Nov 2021	Added (power) grid connected systems
03	Apr 2022	Added energy curves for east/west facing panels, battery info, Energy monitoring App description, microinverters
04	Jul 2022	Added payback estimate, energy consumption for household machines, more battery information, more info on microinverters, solar panel monitoring, fixed a few bugs.
05	Jul 2022	Added payback estimate as function of kWh price (cost and sale) + the Watts App which shows consumption statistics + current kWh cost, disclaimer.