



TEKNOLOGISK  
INSTITUT

PSO ForskVE projekt nr.2012-12029

---

# Anvendelse af el fra solcelleanlæg i indu- strielle processer

---

“ – Gennemgang af muligheder og potentiale for tilpasning mellem forbrug og produktion i forskellige industrisektorer

**Titel:**

Anvendelse af el fra solcelleanlæg i industrielle processer

**Udarbejdet for:** PV grid projektet v/ Gaia Solar

Juli 2015

**Udarbejdet af:**

Teknologisk Institut

Energi og Klima

Gregersensvej, 2630 Taastrup

[www.teknologisk.dk](http://www.teknologisk.dk)

Forfatter: Ivan Katic, Per Henrik Pedersen, Søren Ø. Jensen

## 1. Indhold

2. Baggrund .....	4
3. Teoretiske muligheder for energilagring .....	4
4. Overvejelser i forhold til PV produktion .....	6
5. Forskydning af elforbrug.....	7
6. Analyse af kulde-energilager: .....	11
7. Generelle betragtninger om produktion og energi .....	12
8. Udnyttelse af PV-strøm til industrielle processer: .....	14
9. Forbrugsprofiler og egetforbrug .....	15
10. Teori for energilagring.....	18
11. Økonomiske forhold.....	19
12. Sammenfatning.....	25
13. Referencer.....	26

## 2. Baggrund

Projektet PV Grid omhandler brugen af solcelleanlæg i erhvervsbygninger der ligesom andre solcelleanlæg siden 2012 er underlagt timeafregning. Økonomien i installationstilsluttede anlæg afhænger i høj grad af den elpris ejeren afregner med over for forsyningselskabet, samt af hvor stor en del af solcelleproduktionen der kan forbruges direkte og således kan ligestilles med elbesparelse. I virksomheder kan der være meget forskellige forbrugsprofiler, som passer mere eller mindre godt med produktionen fra et solcelleanlæg, og der er derfor store forskelle på den økonomiske gevinst ved et solcelleanlæg. Efter som den betaling man får for overskudsel nu er nede på 60 øre/kWh for erhverv, er der kommet fokus på at undgå for stort overløb til nettet, på trods af at det overordnet set vil være fornuftigt at lade solstrømmen komme andre forbrugere til gode i det omfang elnettet har kapacitet til det. Dette notat er udarbejdet for PV Grid projektet (støttet af ForskVE programmet) og giver en overordnet vurdering af mulighederne for tilpasning af virksomheders elforbrug, så det bedre kommer til at stemme overens med solcelleanlægs produktion. Produktion som i sagens natur er mest intens i sommerhalvårets dagtimer.

## 3. Teoretiske muligheder for energilagring

Energi findes i mange former, hvoraf nogle er mere egnede til lagring end andre. Elektricitet kan desværre meget vanskeligt lagres i større stil, og det er derfor nødvendigt at konvertere den til andre energiformer. Når det gælder teknologier for lagring af elektrisk energi, skelnes mellem teknologier hvor den lagrede energi kan aftappes som el og så de teknologier hvor energien kun kan aftappes i en anden form. Da der i forvejen indgår en lang række energitransformerende processer i industrien, er det relevant at se om man kan lagre energi i forbindelse med disse. Det kan for eksempel være:

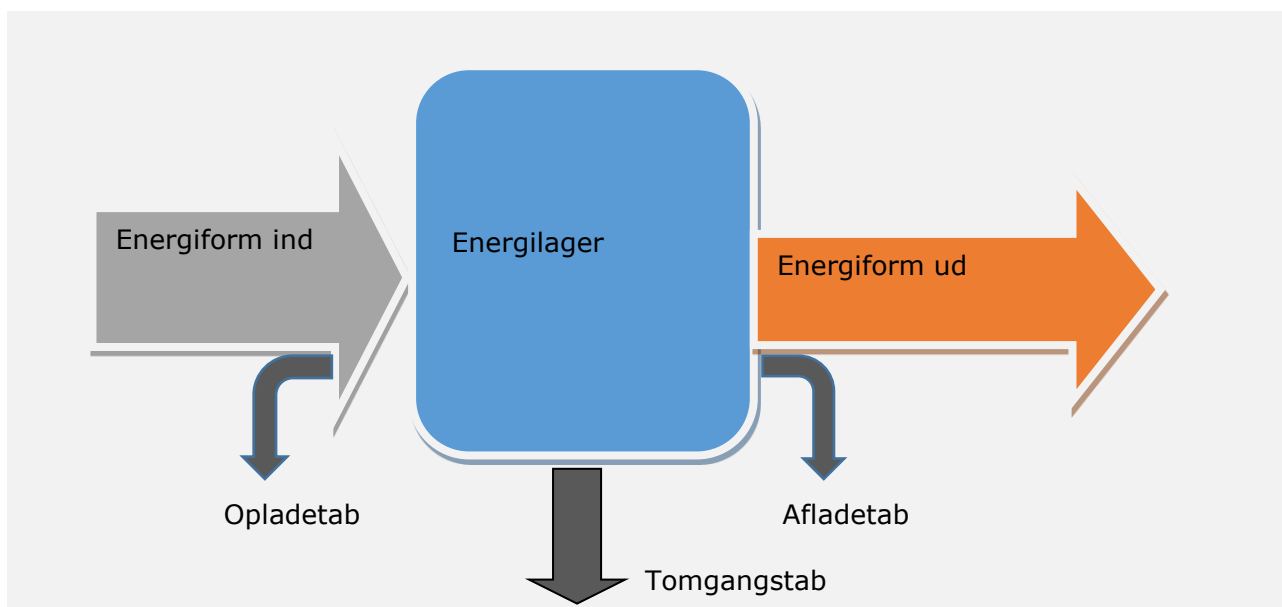
- Lagring som potentiel energi i trykbeholdere og reservoirer
- Lagring som termisk energi i materialer med eller uden faseskift
- Lagring som kemisk energi i batterier
- Lagring som kinetisk energi i svinghjul
- Lagring som færdige produkter eller halvfabrikata

Ikke alle disse forslag er dog lige realistiske eller økonomiske. For at vurdere og rangordne mulighederne for lagring i forbindelse med eksisterende industrianlæg kan man for eksempel bruge tabellerne herunder, som er hentet i en redegørelse om fleksibelt elforbrug.

I en undersøgelse af industriens energiforbrug er fundet følgende oversigt over industrielle energikrævende processer:

Hovedgruppe	Slutanvendelse
Intern energiforsyning	Kedel- og nettab
Procesvarme	Opvarmning/kogning <sup>1)</sup> Tørring <sup>2)</sup> Inddampning Destillation <sup>3)</sup> Brænding/sintring Smeltning/støbning <sup>4)</sup> Anden varme op til 150°C (specificeres!) <sup>5)</sup> Anden varme over 150°C (specificeres!) <sup>5)</sup>
Arbejdskørsel	Arbejdskørsel
Sekundær energi	Belysning Pumpning Køl/frys Ventilation og blæsere Trykluft og procesluft Findeling Omrøring Øvrige elmotorer <sup>6)</sup> Edb og elektronik Anden elanvendelse (specificeres!) <sup>7)</sup>
Rumvarme	Rumvarme <sup>8)</sup>

Opdeling af industrielle processter ifølge [1]. Der kan være andre anvendelser, som ikke er medtaget i tabellen. Slutanvendelsen har betydning for, hvilke afgifter der er pålagt energiforbruget.



Vurdering af lagringsteknologier omfatter bl.a. type/kvalitet af energistrømme samt overførselshastighed[W], kapacitet[kWh] og tab under stilsand samt ved op/afladning.

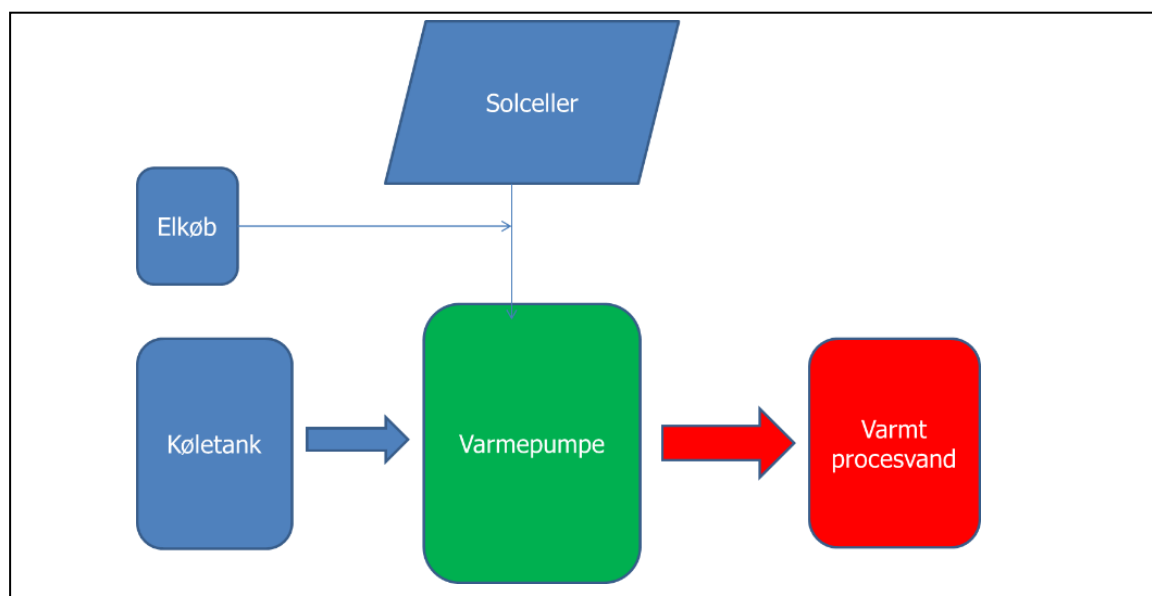
#### 4. Overvejelser i forhold til PV produktion

Ved overskud af el fra solcelleanlæg, er det i princippet muligt at erstatte energi i alle andre former, eftersom elektricitet repræsenterer energi i højeste kvalitet. Således kan el uden videre omdannes til mekanisk energi eller varme, men hvor let der er i praksis vil afhænge af det allerede installerede procesudstyr.

Følgende termiske processer vil eksempelvis kunne optage ekstra elforbrug til erstatning af anden energiform, typisk gas:

- Opvarmning/kogning. I praksis kan en elkedel kobles til parallelt med eksisterende opvarmning, eller helt erstatte denne.
- Tørring. Her kan elforbrug ske i form af en ekstra elvarmeplade eller en luft-luft varmepumpe.
- Inddampning. Hvis det sker i form af opvarmning af åbne kar, kan elvarmetråde monteres i bunden.
- Destillation. Elvarme kan tilføres som ovenfor og køleanlæg evt. forceres for at fremme processen
- Brænding/sintring. Her er der høje temperaturer, og der kræves derfor en ny ovn bygget specielt til formålet (e.x. keramikovn fra gas til el eller kombineret gas/el)
- Smeltning/støbning. Der er mulighed for at bruge el-elektroder til direkte smeltning af ledende materialer (metal), ellers kræves en eller anden type ovn.
- Anden varme under/over 150 °C. Generelt er det enkelt at tilføre (overskuds)el-varme til mange processer, særligt hvis der er tale om opvarmning af materiale med en betydelig varmekapacitet.

Det er ved omlægning fra brændsel til el en oplagt mulighed at forøge nyttevirkning ved at indskyde en varmepumpe. Det er dog ikke muligt ved højtemperaturprocesser

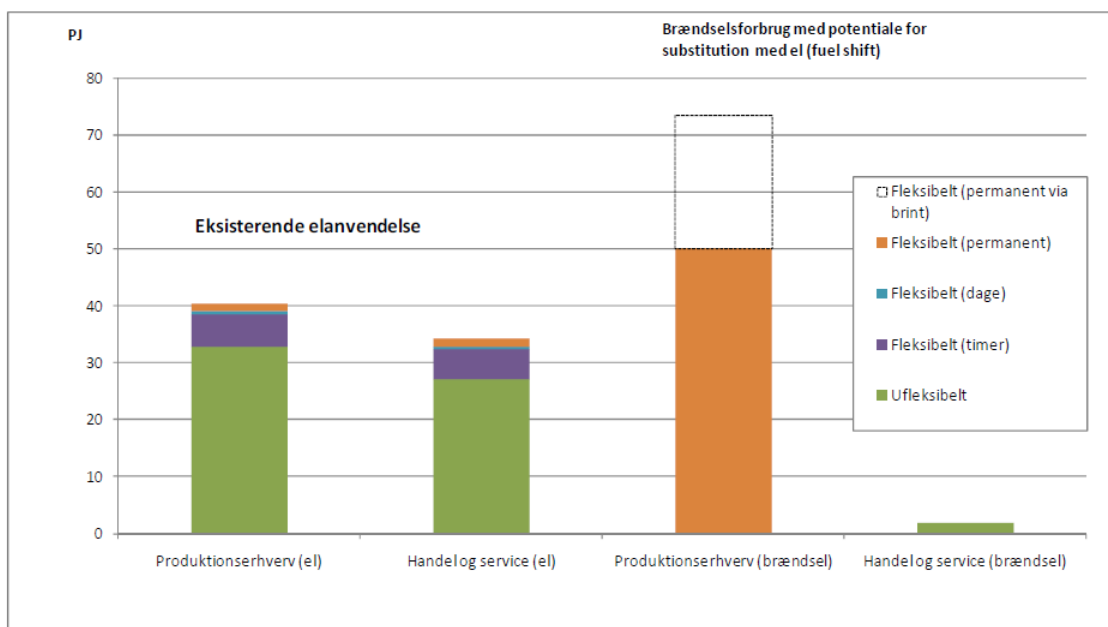


*Dobbelt udnyttelse af varmepumpe, hvis der er behov for både varme og kulde*

Den praktiske temperaturgrænse for leveret varme fra markedsførte varmepumper ligger i dag på cirka 140°C.

## 5. Forskydning af elforbrug

Følgende skal ses som en vurdering af de forskellige erhvervs mulighed for fleksibelt elforbrug. Det fremgår af følgende figur at det som udgangspunkt kun er en ganske lille del af virksomhedernes elforbrug der kan karakteriseres som fleksibelt. Ved omlægning fra brændsler til el vil mulighederne være betydeligt bedre, idet termiske processer normalt har en vis træghed, og der er tale om meget store energimængder.



### Generel analyse af fleksibelt elforbrug i industrien[1]

Figuren viser hvor stor en del af det eksisterende elforbrug der eventuelt kan flyttes uden store omkostninger. Desuden er vist hvor meget af det nuværende brændselsforbrug der kan erstattes af elforbrug. Kilden [1] angiver dog at der er stor usikkerhed på angivelserne.

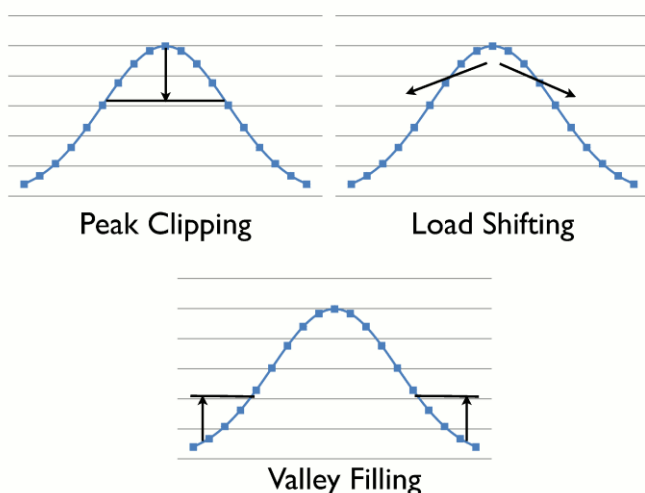
Der er en række forskellige definitioner på flytning af forbrug [1] som skal nævnes her:

Ved **load-shift** flyttes forbrug fra en periode (den dyre) til en anden (den billige). Denne metode har en dynamik som et energilager. Visse typer flytning af forbrug krævet et vist varsel, idet effekten går ud på at fremskynde et forbrug. Det gælder fx islagre.

**Fuel-shift** drejer sig om at skifte mellem el og andre brændsler. Det kunne fx være en industrivirksomhed, som både er udstyret med en elkedel og en biomassekedel og flekser imellem disse forsyningsformer afhængigt af el- og biomasepriserne.

Ved **peak clipping** reduceres elforbruget til "luksusanvendelser", når elpriserne er høje (og ofte også elforbruget). Der er her tale om forbrug, der ikke vender tilbage. Et eksempel kunne være at reducere belysningen i butikker udenfor åbningstiderne, når elpriserne er meget høje.

**Valley-filling** handler om at tilføje et nyt forbrug ved særligt lave eller negative priser. Det kunne fx dreje sig om særlige luksus-forbrug, fx opvarmning af udendørs swimmingpools mv.



Rapporten konkluderer: "Det største potentiale for fleksibelt elforbrug vurderes at ligge indenfor loadshift og fuel-shift. Peak clipping kan også spille en mindre rolle, mens valley filling kun ville være relevant på tidspunkter med meget lave eller negativt priser." Den sidste er netop relevant ved overskud af egen VE elektricitet.

Et forsøg på en opdeling af potentialet for fleksibelt elforbrug på de forskellige anvendelse er vist herunder.[1]



Produktionserhverv Sekundær energi (TJ)	Forbrug	Potentiale %	Samlet po- tentiale for fleksibilitet	Heraf		
				Timer	Dage	Permanent
Belysning	3.790	5%	190	0		190
Pumpning	4.583	20%	917	458	458	
Køl / frys	3.026	50%	1513	1513		
Ventilation og blæ- sere	8.004	30%	2401	2401		
Trykluft og proces- luft	3.977	20%	795	795		
Øvrige elmotorer	10.754	5%	538	538		
EDB og elektronik	378	5%	19	19		
Anden elanvendel- se	418	0%	0			
<b>Total</b>	<b>34.930</b>		<b>6.372</b>	<b>5.725</b>	<b>458</b>	<b>190</b>

Tabel 5: Samlet potentiale for fleksibelt elforbrug indenfor sekundær energi i produktionserhverv.

Tabellen viser især at der er meget stor forskel på hvilke typer elforbrug som kan flyttes i tid. For eksempel vil belysning være bundet til det øjeblikkelige behov. For at kunne rådgive den enkelte virksomhed, er man derfor nødt til at se på de individuelle forbrug.

**Belysning:** Arbejdsmæssig belysning vil oftest være tændt i dagtimerne og kan derfor af-tage el fra solceller direkte. Belysning kan ikke gemmes til senere, men de processer hvor der kræves lys, kan måske flyttes. Sikkerhedslys (overvågning) vil ligge i de mørke timer, og kan derfor ikke udnytte solstrøm direkte.

**Pumpning:** Pumpning kan opdeles i processer med kritisk flowstyring og ukritiske syste-mer, hvor der f.eks pumpes op i et reservoir eller en tryktank. I sidstnævnte tilfælde er der gode muligheder for tidsmæssig forskydning af forbruget, alt efter reservoirets stør-relse i forhold til forbruget. Der vil dog være grænser for reservoirstørrelse, eksempelvis i fødevarerindustrien, da procestiden ikke må blive for lang af hensyn til færdig produktkva-litet. Der udvikles dog også større pumpelagre til central energilagring, for eksempel har Gramkow bygget en prototype med en "ballon" som hæver et tungt jorddække ved oplad-ning og sænker det igen ved afladning.

**Køl/frys.** Der er her særdeles gode muligheder, idet der ofte er stor tolerance med hensyn til lagringstemperatur af nedkølede emner. Der er mest energi at hente ved faseovergang (indfrysning), så hvis den del af processen kan køre når der er mest sol, vil egetforbruget kunne øges uden større omkostninger. Produktkvaliteten kan dog blive påvirket ved for lang ventetid. Et stort EU projekt har undersøgt potentialet for at udnytte overskudsstrøm fra vindmøller i store kølehuse efter samme princip. Der findes i Danmark cirka 1,9 mill m<sup>3</sup> kølelager som potentielt kan bringes i spil som termisk energilagring. (ProjektNightWind <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/121790181EN6.pdf> )

Ventilation og blæsere. Disse aggregater vil hovedsageligt køre i dagtimerne i forbindelse med processer og komfort. De kan i mange tilfælde stoppes i korte intervaller uden gene, men næppe flere timer. Muligheden for at forbruge ekstra solstrøm ved at forcere driften er begrænset hvis komforten skal opretholdes. Til gengæld er det meget udbredte systemer.

Trykluft og procesluft. Trykluft benyttes i vid udstrækning til at drive mekaniske procesværktøjer, og der er som regel et lille trykluftlager skudt ind i disse systemer. Det vil være oplagt at styre kompressoren, således at den oplader tryktanken når der er overskud af solstrøm, men det er forholdsvis små energimængder der er tale om. Man kunne forestille sig at indbygge større tryktanke ved udskiftning og fornyelse, men tendensen er generelt at man går væk fra trykluft og over til mere effektive elektrisk drevne værktøjer.

Øvrige elmotorer. Igen er der mest tale om drift i dagtimerne, hvilket passer godt med solcelleproduktion. Om man kan skrue op eller ned for forbruget, afhænger af den specifikke sammenhæng.

IT og anden elektronik. Kan næppe flyttes i sig selv, men hvis der er et UPS anlæg med batterilager tilknyttet, vil dette kunne optage fluktuationer i PV anlæggets produktion. Dog kun hvis batterierne er overdimensionerede i forhold til deres primære nødstrømsfunktion, da UPS anlæg altid skal have en vis standby kapacitet.

Elektrisk transport. Elektriske trucks og andre elkøretøjer kan fungere som ellager, men man kan risikere at skulle gå på kompromis med driftstid og fleksibilitet.

## Tysklands største alu-værk vil producere, som vinden blæser



Trimet Aluminiums fabrik ved den vesttyske by Essen vil forsøge at lagre strøm. (Foto: Wikipedia)

Strømprisen svinger nu så meget i Tyskland, at Trimet Aluminium vil skrue op og ned for

IMPLEMENT CONSULTING GROUP  
Projektlederuddannelse  
**IPMA®-Registreret**  
**INGENIØRENS KURSUSGUIDE**  
Søg blandt over 2.000 relevante kurser inden for teknik, IT og ledelse

### Relaterede job

**DONG energy** Senior driftssupporter

**DONG energy** Team Lead til afdeling med ansvar for udvikling af optimeringsmodeller

Num Lov

*Eksempel på en stor industrikunde, som har fundet ud at spare på elomkostningerne ved at flytte forbruget i tid.*

Ifølge en artikel på Ingeniørens netavis den 11. december 2014 planlægger den tyske aluminiumproducent Trimet Aluminium at skrue op og ned for produktionen af aluminium efter prisen for vindmøllestrøm.

## 6. Analyse af kulde-energilagere:

En af de mere oplagte lager-metoder er i forbindelse med køling, og dette emne er derfor behandlet mere detaljeret i dette afsnit. Der er (mindst) to metoder til kuldelagring:

- Oplagring i islager
- Forceret nedkøling af fryserum

Islager med normal is:

Man kan oplagre energien i et islager. Det fungerer ved, at et køleanlæg udfryser is i en tank med vand. Isen kan genereres, når der er overskud af el. Om natten og i perioder uden PV-strøm kan den oplagrede "kulde" benyttes til køling med f.eks. et vandbåret system, hvor vandet køles under afsmeltning af is, og det kolde vand pumpes til nedkølingsstedet, f.eks. i et supermarked til køling af gondoler, reoler m.v. Det kan også være i procesindustrien til afkøling.

Islagre er forholdsvis dyre (størrelsesordenen 100.000 kr for et lager på 80 kWh (kilde: Christian Heerup, TI). Endvidere er det en ulempe, at køleanlæggets effektivitet er mindre om dagen, når udeluften er relativ varm.

Islager med sjapis: I Karlsruhe i Tyskland har man bygget et specielt køleanlæg i forbindelse med centralkøkkenet på Karlsruhe Institute of Technology. Dette køkken producerer ca. 8.000 måltider om dagen. 4 køleanlæg med propan fryser sjap-is i en 40 m<sup>3</sup> stor tank. Sjapis er en blanding af is og vand (eventuelt tilsat lidt sprit eller glykol). Sjapis kan pumpes rundt i et kølesystem, hvor isen (eller noget af isen) smelter under afkøling af kølerum, kølereoler m.v.. Lagertanken er under konstant omrøring, og iskoncentrationen reguleres mellem 5 % og 30%. Der er derfor en stor fleksibilitet, som udnyttes til at lagre is om natten, hvor strømmen er billigst. Teknologien kunne også udnyttes til at forbruge PV-el. Anlægget i Karlsruhe har formentlig været dyrt, og der er tale om et demo-anlæg, som har fået stor økonomisk støtte fra flere sider. <http://www.hafner-muschler.de/en/themen/navigation/ice-banks/ice-banks-glycol-ice-banks.html>

Energiindhold:  $1000\text{kg} \cdot 0,25 \cdot 334 \text{ kJ/kg} = 83.500.000 \text{ J} = 23,2 \text{ kWh/m}^3$ .

Kølerum/fryserum: Man kan med fordel benytte overskuds-el til at sænke temperaturen af fryserum. Fødevarer i fryserum skal oplagres ved temperaturer på -18 °C eller lavere. Her kan man ved hjælp af det eksisterende køleudstyr sænke temperaturen af fødevarer, inventar, betongulv m.v. til en lavere temperatur (f.eks. til -25 °C), og senere, hvor der ikke er PV-el kan man i en periode slukke for køleanlægget, mens temperaturen langsomt hæves op til max. -18 °C. Dette må anses som en billig løsning, da det ikke omfatter større investeringer, bortset fra styring af processen. Fryserum er forholdsvis fleksible, da der sjældent er en nedre grænse for temperaturen. I praksis vil der være grænser for, hvor meget man kan sænke temperaturen: Dels køleanlæggets kapacitet, som bliver lavere med lavere fordampningstemperatur, dels vil ekstrem kulde kunne medføre skader på bygningen og endelig vil der måske være frysevarer, som tager skade af meget kolde temperaturer.

Større kølerum er ofte fremstillet af sandwich-isoleringspaneler af PU-skum med tynde stålplader på begge sider. Dette er lette konstruktioner. Gulvet er ofte af beton. I tomme fryserum (eller fryserum med kun få varer) vil kulden derfor primært blive akkumuleret i gulv. Hvis man antager, at der kan ske en akkumulering af kulde i beton i de øverste 5 cm og med en afkøling på 5K, så vil energitætheden være:

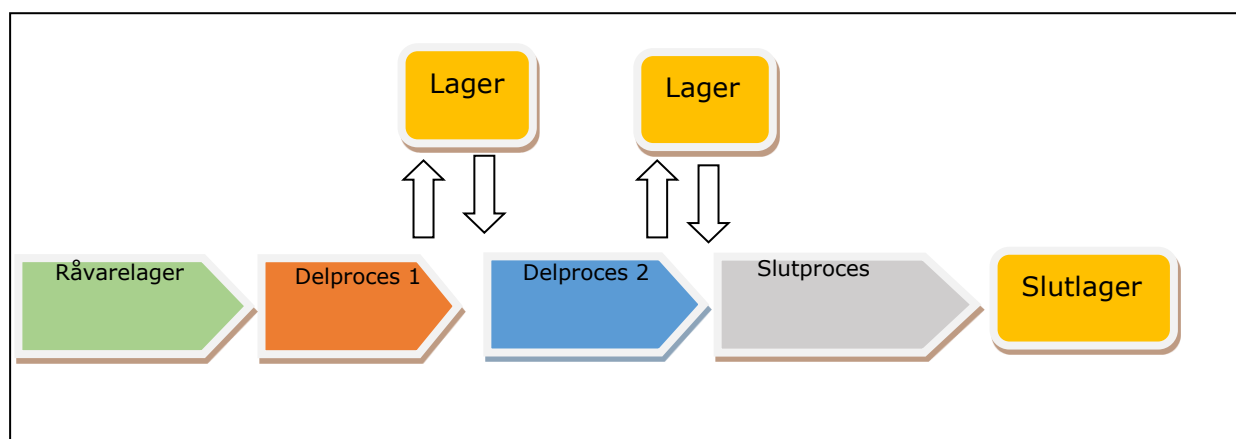
$$Q = (0,05 \cdot 1 \cdot 1) \text{m}^3 \cdot 2024 \text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{m}^3) \cdot 5 \text{K} = 506.000 \text{J} = 0,141 \text{kWh/m}^2.$$

Hertil kommer afkøling af varer og inventar.

For kølerum er fleksibiliteten mindre, da man normalt ikke skal risikere frostska-der af varerne. Normalt opbevares letfordærlige fødevarer ved +3 - +5 C. Nogle varer har dog lidt andre opbevaringstemperaturer. Men fælles for alle kølerum er, at temperaturen ikke kan variere så meget. Man skal derfor have en stor masse af varer, for eksempel fyldte flasker, for at kunne lagre betydelige energimængder.

## 7. Generelle betragtninger om produktion og energi

I produktionsindustrien vil en produktionslinje normalt kunne nedbrydes i en række delprocesser som resulterer i hver deres halvfabrikata. Disse produkter kan udgøre en form for buffer, hvis det er praktisk muligt at accelerere visse dele af produktionslinjen, mens andre holder stille.



*Eksempel på direkte lagring af energikrævende produkter. Hvis f.eks. delproces 1 er energitug, kan den accelereres ved el-overskud og halvfabrikata lagres til senere. Typisk bedst ved ufølsomme varer, f.eks. mekanisk industri.*

Energilagring i form af forcerede delprocesser er naturligvis kun mulig hvis der er en margin at give af, det vil sige hvis produktionsanlægget ikke er udnyttet fuldt ud i forvejen. Umiddelbart vil det være nemmest at gemme meget energi i forbindelse med varme- eller køleprocesser, og i nogen tilfælde vil man også kunne spare energi. Det gælder f.eks. hvis et opvarmet emne kan få tid til at køle naturligt af på lager, inden det går videre til en køleproces.

Energilagring i forbindelse med rumvarme og komfortkøling kan også være en mulighed. Hvis virksomheden f.eks. er forsynet med fjernvarme, vil selve fjernvarmenettet have et

stort potentiale for afsætning af overskudsel. Det kunne for eksempel være en varmepumpe som trækker varme ud fra en produktionshal og leverer denne til fjernvarme. De afgiftsmæssige og økonomiske forhold skal dog undersøges nærmere for at vurdere om det er en realiserbar ide. Komfortkøling er måske mere interessant, fordi der umiddelbart er godt sammenfald med PV produktion og fordi el til komfortkøling koster mere end el til produktion.

Fjernkøling med energilagring i koldt vand vil også være en mulighed i forbindelse med etablering af nye net for køling af kontorbygninger og lignende.

### Effekt og energi

Ved energilagring er det vigtigt at skelne mellem effekt (W) og energi (Wh eller J). Nogle processer er begrænsede i hvor hurtigt de kan oplade og/eller aflade. For eksempel vil en stor trykbeholder kunne indeholde en del energi, men hvis der sidder en lille kompressormotor på den, er dette en begrænsende faktor for opladningshastigheden. Omvendt kan et kraftigt varmelegeme aftage meget el, men hvis det sidder i en lille beholder, vil den hurtigt blive mættet med termisk energi. Solcelleanlæg på virksomheder vil typisk have en effekt på 50-500 kW, og dette tal er afgørende for de praktiske muligheder for energikonvertering på bestående industriudstyr. Hvis energien minimum skal gemmes nogle timer, er der tale om lagring af 100 kWh og op efter.

Der findes en rig litteratur med analyser af de forskellige lagringsteknologier, hvor en enkelt vedrørende ellagring er vist herunder. Den bedst udviklede teknologi for lagring i de tidsintervaller der er relevante for dette studier er formentlig batterier.

Storage Technologies	Main Advantages (relative)	Disadvantages (Relative)	Power Application	Energy Application
Pumped Storage	High Capacity, Low Cost	Special Site Requirement		●
CAES	High Capacity, Low Cost	Special Site Requirement, Need Gas Fuel		●
Flow Batteries: PSB VRB ZnBr	High Capacity, Independent Power and Energy Ratings	Low Energy Density	◐	●
Metal-Air	Very High Energy Density	Electric Charging is Difficult		●
NaS	High Power & Energy Densities, High Efficiency	Production Cost, Safety Concerns (addressed in design)	●	●
Li-ion	High Power & Energy Densities, High Efficiency	High Production Cost, Requires Special Charging Circuit	●	○
Ni-Cd	High Power & Energy Densities, Efficiency		●	◐
Other Advanced Batteries	High Power & Energy Densities, High Efficiency	High Production Cost	●	○
Lead-Acid	Low Capital Cost	Limited Cycle Life when Deeply Discharged	●	○
Flywheels	High Power	Low Energy density	●	○
SMES, DSMES	High Power	Low Energy Density, High Production Cost	●	
E.C. Capacitors	Long Cycle Life, High Efficiency	Low Energy Density	●	◐

Sammenligning af egenskaber for udvalgte lagringsteknologier fra Energy Storage Association (<http://energystorage.org/> )

## 8. Udnyttelse af PV-strøm til industrielle processer:

Ved anvendelse af solcellestrøm i industrien, er der en række overvejelser som bør gøres i forhold til anlæggets størrelse og den måde det kan indpasses i produktionen. I de følgende forslag til trinvis strategier er der taget udgangspunkt i virksomhedens primære produktion, og den påvirkning som strateginiveauet vil få for produktionen.

1. Step: Simpel substitution af købe-el med PV-el fra egen produktion. Denne strategi har hidtil været fuld ud tilstrækkeligt for mange virksomheder med PV-produktion og svarer til situationen for mange husejere med PV-paneler. Hvis denne strategi medfører, at virksomheden hovedsagelig selv kan aftage PV-produktionen, så er der ikke grund til at gøre yderligere. Produktionen kan forsætte som hidtil. Hvis der

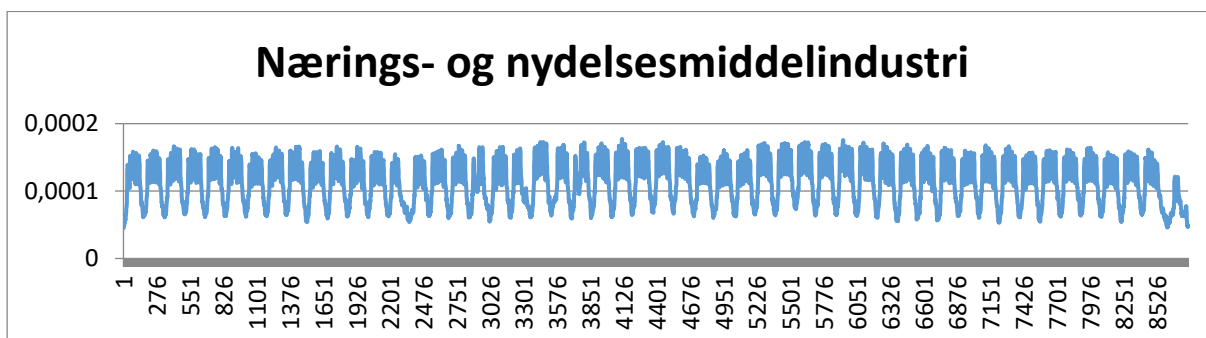
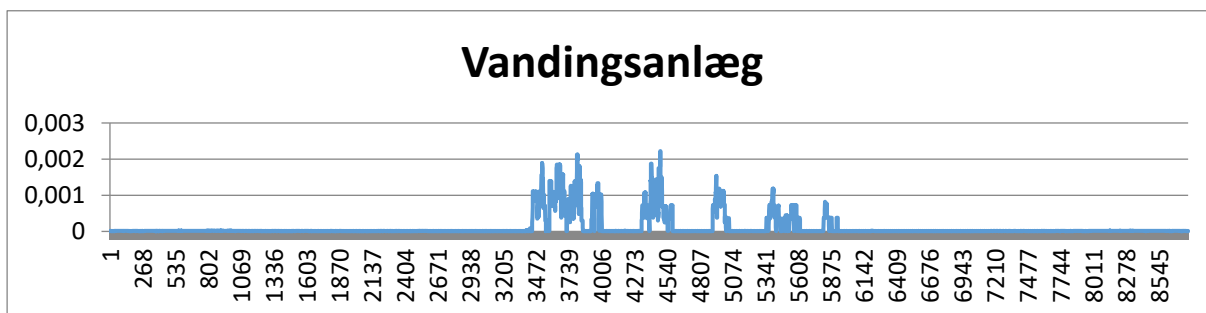
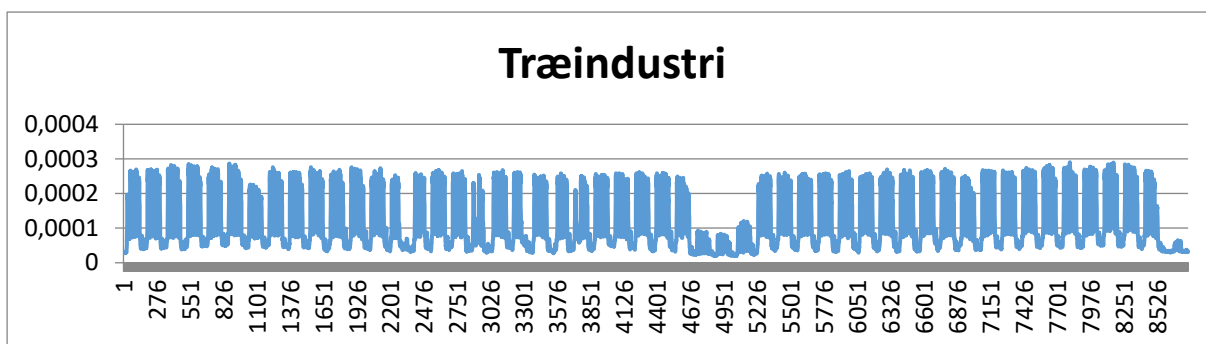
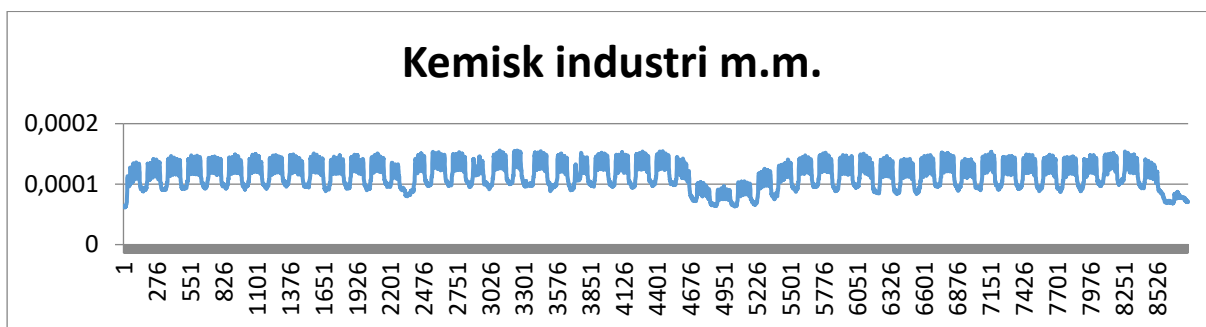
(som det ofte er tilfældet) er et begrænset areal til solceller i forhold til elbehovet, giver det sig selv at man ikke går videre til step 2.

2. Step: Hvis virksomheden forbruger fossile brændsler til termiske processer, så kan man erstatte noget af dette med elvarme. Dette kan gøres meget fleksibelt, og bør kunne reguleres, således at det ikke påvirker produktionen. Dette kan være meget aktuelt for mange virksomheder (tørring, smeltning, sintring m.v.). Her er der et stort potentiale! Ved processer  $< 150\text{ C}$ , vil elforbrug i varmepumpe kunne bidrage til processen.
3. Step: Hvis der er et signifikant overskud af PV-el, så kan man overgå til denne strategi, som introducerer simple og effektive styringer, som ikke (direkte) påvirker produktionen. Der kan være tale om at forcere køleanlægget i kølerum til opbevaring af frostvarer, forcere rumkøling når der er overskud af PV-el o.l. Der er tale om simple former for termisk energilagring, som ikke direkte påvirker produktionen.
4. Step: Denne strategi ligner lidt den forrige, bortset fra, at der indføres lidt mere avanceret energilagring i perioder med overskuds-el. Det kunne være opbygning af islagre til køling om natten. Det kan også være andre former for energilagring (f.eks. batterier).
5. Step: Denne strategi påvirker produktionen i nogen/høj grad. Produktionen stopper eller reduceres, når der mangler PV-strøm. Det vurderes, at denne strategi ikke vil være realistisk i normale produktionsvirksomheder, men kun i specielle meget automatiske produktioner, hvor der ikke er arbejdskraft, som går ledige i perioder uden strøm.
6. Step: den mest radikale strategi, hvor produktionen er direkte styret af PV-produktionen. Nu er der tale om tilpasninger, som radikalt vil påvirke produktionen/påvirke arbejdet i virksomheden. Der kan f.eks. være tale om at stoppe eller forcere produktion af el-intensive halvfabrikata afhængig af PV-produktionen. I denne strategi vil virksomhedens produktion være direkte styret af produktionen fra PV-paneler, og det vil formentlig kun være realistisk ved produktion af meget energi-intensive produkter og en høj grad af automatisering. Det er formentlig et scenarie, som vi ikke vil se lige med det samme. Produktion af rå aluminium kunne teoretisk være et emne, men vil nok vare et stykke tid før det kan konkurrere med billig vandkraft i Norge og på Island. Produktion af kunstgødning kunne være et tilsvarende eksempel. Et tredje eksempel kunne være afsaltning af havvand.

## 9. Forbrugsprofiler og egetforbrug

Ved beregning af forbrugsfordelingen over et år, kan man som udgangspunkt bruge tilgængelige standardprofiler for forskellige brancher. Disse aggregerede måledata er samlet i de såkaldte elforbrugspaneler og viser elforbruget på timeniveau.

På de følgende figurer er X-aksen årets timer og Y-aksen er det relative elforbrug.



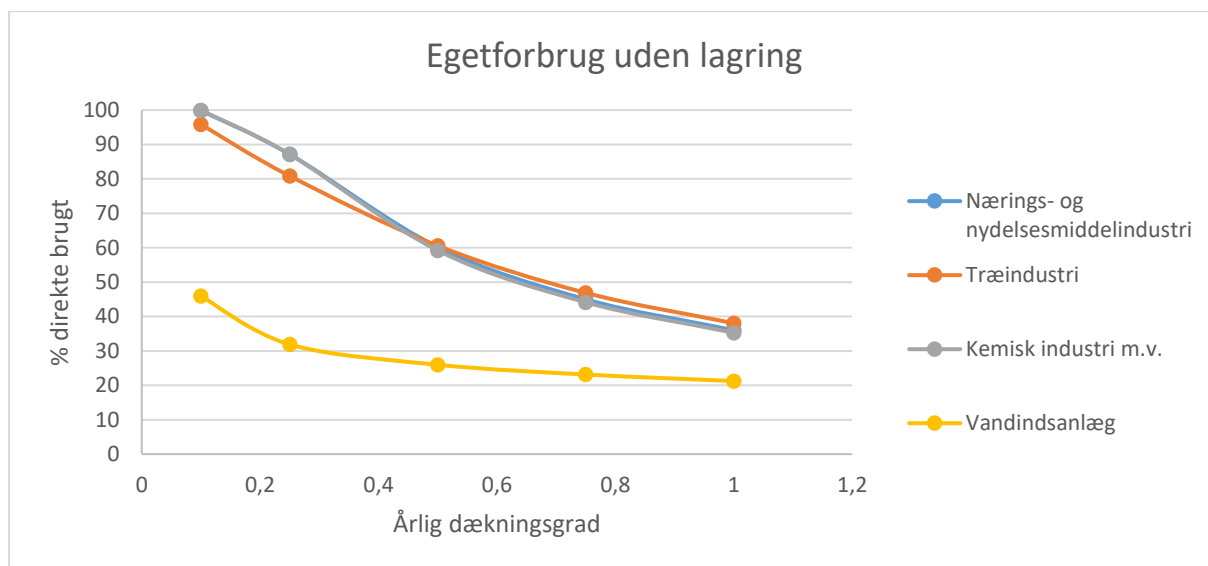
Det er tydeligt at visse erhvervssektorer, som eksempelvis kemisk industri, har en høj grundlast, og derfor er velegnede til at optage el fra solceller uafhængig af produktionskurven. Nogle sektorer kører dog på lavt blus om sommeren, hvilket trækker ned i forhold til egetforbruget.

Profilerne gælder ikke nødvendigvis for de individuelle produktionsanlæg, og man bør derfor om muligt fremskaffe de seneste års tidsserier for at kunne lave en retvisende analyse

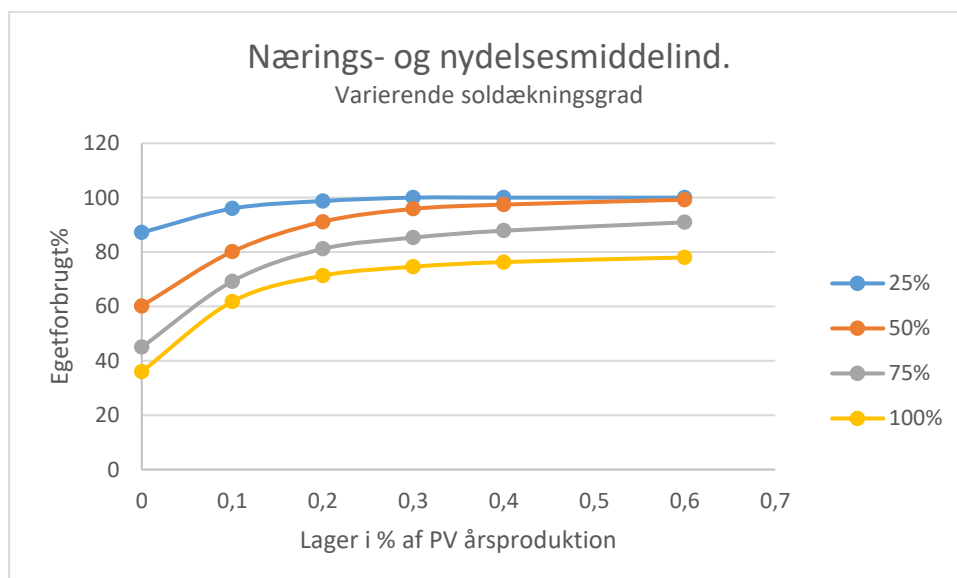


i de konkrete tilfælde. Man kan for eksempel dimensionere PV anlægget så det aldrig overstiger grundlasten.

Der er i det følgende gennemført beregninger i af det teoretiske egetforbrug for standardprofiler ud fra timeværdier for et sydvendt solcelleanlæg med 45 graders hældning. [PVsyst data]



Figuren viser at kun ved meget atypiske forbrug (vandingsanlæg) er der en væsentlig afvigelse fra "gennemsnitskurven" for de viste industrier. Ved tilpas små solcelleanlæg kan næsten al strømmen bruges direkte inden for en time, og der er derfor ikke noget incitament til at flytte forbrug eller lagre energi.



Figur som viser beregnet egetforbrug ved 25-100% årlig dækning og varierende lagerstørrelse (Nærings- og nydelsesmiddel branchen). For et solcelleanlæg på f.eks. 100 kWp og årsproduktion 100.000 kWh vil en passende lagerstørrelse være  $0,2\% * 100.000 = 200$

kWh. Større lager giver ikke en væsentlig forøgelse af egetforbruget da kurverne hurtigt flader ud.

I den ovenstående analyse er der regnet med 100% effektiv energilagring uden begrænsning i overførselshastighed (effekt). Ved en mere detaljeret analyse må man simulere produktion og forbrug med højere tidsopløsning end en time for at få de reelle spidslaster med, ligesom der bør indregnes energitab ved lagring.

## 10. Teori for energilagring

I det følgende er givet nogle teoretiske regneeksempler på energilagring med udgangspunkt i udstyr der generelt anvendes i industrien, og med nogle udvalgte dimensioner som er fundet at være realistiske/typiske. For generelle beskrivelser af energilagringsteknologier, henvises for eksempel til [6].

### Trykluft

Teoretisk adiabatisk lagring i trykluftbeholder, f.eks 1000 liter med trykstigning fra 10 til 40 bar (4 MPa):

1 m<sup>3</sup> luft hvor trykket øges fra 1 til 4 MPa kræver i teorien en energitilførsel på

$$4 \times 1 \times \ln(1/4) = -5,5 \text{ MJ} = -1,5 \text{ kWh (se bort fra fortegn)}$$

Større tryk er i teorien mulig, men det vil stille voldsomme krav til beholder og kompressor i forhold til det udstyr der som standard bruges i industrien.

### Simpel varmelagring

Lagring i varmtvandsbeholder på 1000 liter ved temperaturstigning på 30K

$E = M \cdot C_p \cdot \Delta T = 1000 \text{ kg} \times 4,186 \text{ kJ/kgK} \times 30\text{K} / 3600 = 35 \text{ kWh}$ . Hvis energien tilføres med en varmepumpe og ikke med direkte elvarme, skal man huske at dividere med varmepumpens COP, og derfor bliver den mængde el der kan afsættes mindre.

Lagring i betonvolumen ved 5cm tykkelse og 5K temperaturændring

$E = V \cdot C_v \cdot \Delta T = (0,05 \cdot 1 \cdot 1) \text{ m}^3 \cdot 2024 \text{ kJ}/(\text{K} \cdot \text{m}^3) \cdot 5\text{K} = 506 \text{ kJ} = 0,141 \text{ kWh/m}^2$ . Her vil energien fra betongulvet blive fjernet med et køleanlæg med en typisk kølevirkningsgrad på 1,4, og der vil derfor kun blive afsat cirka 0,1 kWh el.

### Potentiel energi

Pumpe: 100 m<sup>3</sup> vand pumpet 10 m op:

$$E = m \cdot g \cdot h = 100.000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 10\text{m} = 9,81 \text{ MJ} = 2,7 \text{ kWh}$$

100 tons jord løftes 5 m:

Potentiel energilagring er =  $M \cdot g \cdot h = 100.000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 5 \text{ m} = 4,9 \text{ mill kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 1,36 \text{ kWh}$ .

## Smeltevarme

Smeltning af 1 T aluminium:

$1000 \text{ kg} \cdot 401 \text{ kJ/kg} = 111 \text{ kWh}$

Tank på  $1 \text{ m}^3$  med 0-30% sjapis:

$300 \text{ kg is} \cdot 334 \text{ kJ/kg} = 93 \text{ kWh}$  Her vil energien fra indfrysning blive fjernet med et køleanlæg med en typisk kølevirkningsgrad på 1,4, og der vil derfor kun blive afsat cirka 66 kWh el.

Eksemplerne skal illustrere de meget store forskelle der er i energitæthed ved forskellige former for energilagring. Man skal også huske at nogle teknologier er gode til at omsætte en høj effekt, andre er gode til at lagre store energimængder.

## 11. Økonomiske forhold

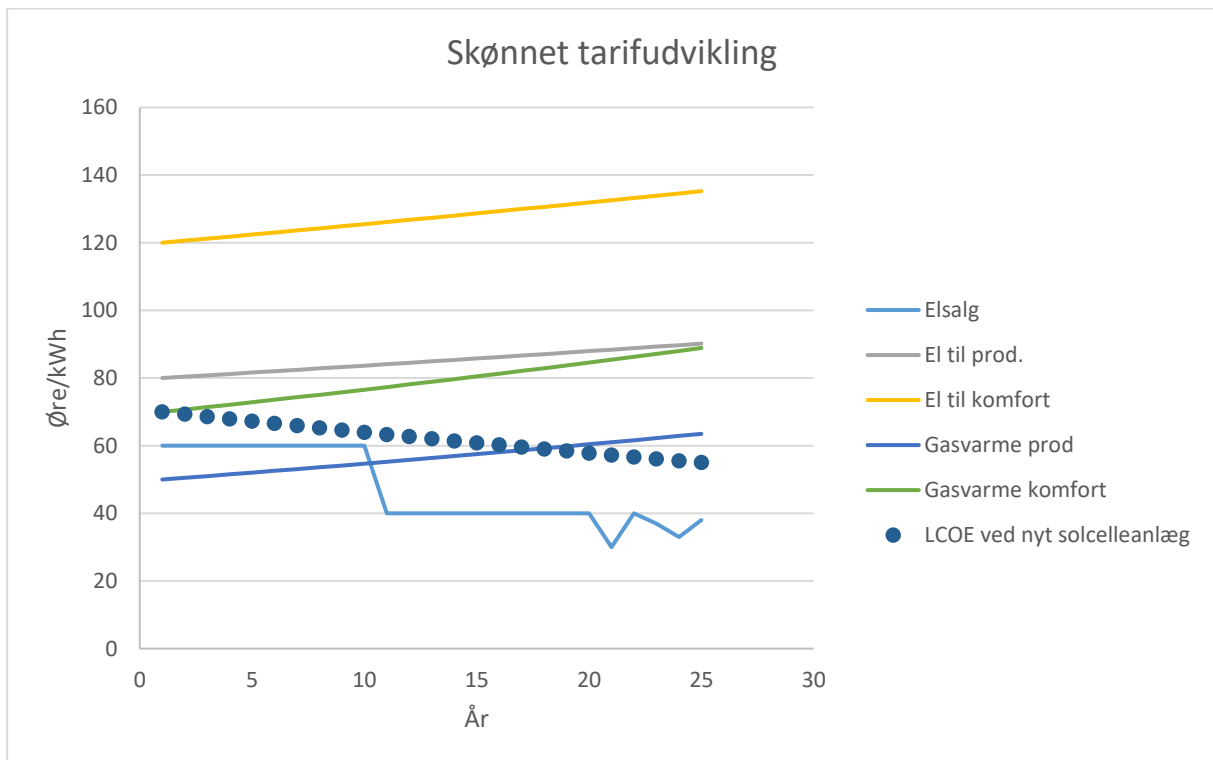
Foruden de tekniske muligheder må man også vurdere omkostninger til investering og vedligehold for de forskellige tiltag.

Ved forceret brug af solcelle-el er det desuden af stor betydning hvilken form for forbrug i industrien der erstattes, idet forskellige slutanvendelser af el er pålagt forskellige afgifter. Generelt gælder det:

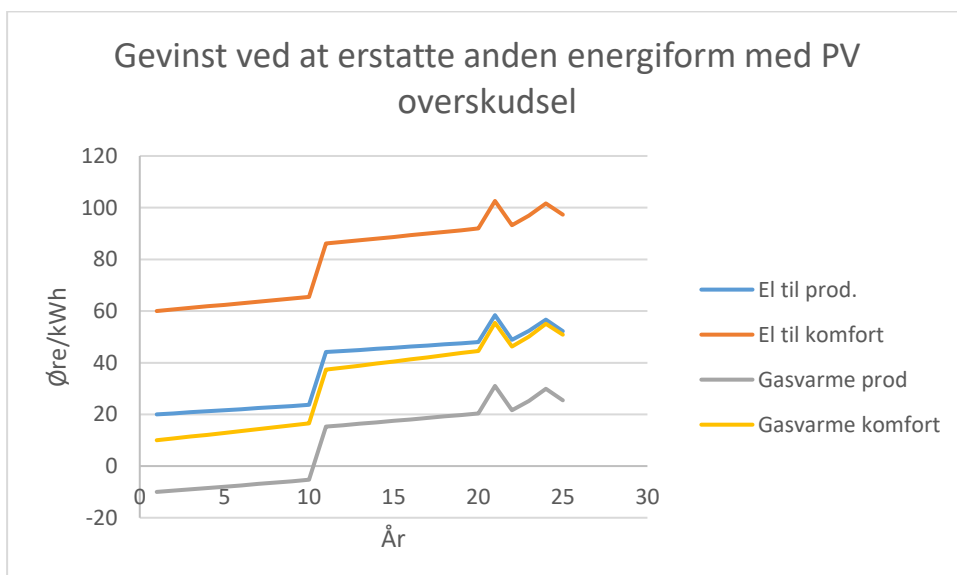
Slutanvendelse -->	Komfortkøling	Komfortvarme+VV	Liberale erhverv	Produktion
<i>Sammenfald med produktion</i>	God	Dårlig	Rimelig	Rimelig
<i>Elpris 2014</i>	Normal minus 42 øre/kWh	Normal minus 42 øre/kWh	Normal	Normal - 83 øre/kWh
<i>Lagring?</i>	Kuldetank+ bygningssmasse	Varmetank+ bygningssmasse	Få muligheder, f.eks elbil	Procesafhængig

Typisk ligger normalprisen for el i 2014 (med afgifter, uden moms) på 1,6 kr/kWh. For større kunder kan prisen dog være lavere. Det fremgår at el til produktion slipper meget billigere end el til andre anvendelser, og det er derfor vigtigt at analysere elforbrugets

sammensætning for at kunne regne på økonomien i et givent solcelleprojekt. Ved frem-skrivning af energipriser er der stor usikkerhed og mange kilder at vælge imellem. I det følgende er antaget en årlig stigningstakt på 0,5% for el og 1% for gas. For nye solcelle-anlæg er der regnet med et fald i elprisen på 1% pr år. Beregningerne skal ses som illu-strationer af udviklingen, og ikke eksakte angivelser.



Grafik som viser den overslagsmæssige kWh pris for forskellige energiformer (i 2015 pri-ser). Forskellen ned til kurven med elsalg afspejler gevinsten ved at substituere med over-skuds solcellestrøm (60/40 afregnet). Forskellen ned til kurven med Levelized Cost of Energy afspejler hvor konkurrencedygtigt et nyt solcelleanlæg vil være på et givet tids-punkt (forventet prisudvikling fra 2015 og frem)



Graf som viser hvordan det økonomiske incitament til at anvende overskudsel til forskellige formål stiger men over anlæggets levetid i takt med faldende afregningspris og stigende energiomkostninger. Efter 20 år afregnes til markedspris.

Med en indtægt på 60 øre/kWh for solgt solcelle el og en udgift på godt 80 øre/kWh for proces el er der kun 20 øre forskel på eget-forbrug og salg, hvorimod der er cirka 60 øres forskel ved komfort el. Det er altså økonomisk set langt mere interessant at diskutere lagring i forbindelse med komfort end proces, men der vil oftest være begrænsede muligheder da der er meget lidt varmebehov om sommeren hvor solcelleproduktionen er størst.

Som rettesnor kan man gå ud fra at overskydende solcellestrøm vil kunne oplade et lager (eller flytte en proces) så det svarer til cirka 200 dage ful opladning/afladning om året. For at der skal være økonomisk mening i at etablere det nødvendige udstyr, må det ikke koste mere end den energi der potentielt kan flyttes i anlæggets levetid. Hvis prisgevinsten f.eks. er 50 øre/kWh og levetiden 10 år, bliver det maksimale beløb  $0,5 \times 200 \times 10 = 1000$  kr investeret pr kWh som flyttes.

I det følgende er der opstillet tabeller for økonomi samt vigtigste egenskaber ved energilagring i almindeligt industriinventar, idet eksemplerne er baseret på et 100 kW solcelleanlæg. De økonomiske overslag er baseret på katalogværdier for en del af tilfældene og andre er vurderet ud fra beslægtede teknologier. (Beløb uden moms)

### VE til proces

Energistyrelsens ordning VE til proces åbner principielt mulighed for at få op til 65% støtte til etablering af VE anlæg til procesformål. Da man imidlertid fraskriver sig udbetaling af pristillæg (Markedspris i stedet for 60 øre/kWh) i hele anlæggets levetid og der i praksis er et støtteloft på cirka 830 kr/kWh vil det ofte forringe projektets økonomi hvis man benytter denne mulighed. Kun i tilfælde hvor der næsten ikke er noget salg til nettet vil ordningen være attraktiv.

<b>Opvarmning af beholdere med varmt vand</b>	<i>Kap.100 kWh (en fuldlast-time)</i>	<i>Kap. 1000 kWh (10 fuldlasttimer)</i>
<i>Volumen (Antaget 30 K temperaturinterval til varmelagring)</i>	2,87 m <sup>3</sup>	28,7 m <sup>3</sup>
<i>Pris cirka kr</i>	40.000 beholder Elkedel 50 kW ca 60.000	100.000 beholder Elkedel 100 kW ca 100.000kr
<i>Holdbarhed</i>	Cirka 10 år (uændret i.f.t. reference)	
<i>"Lagerpris"</i>	$100000\text{kr}/(10 \text{ år} \cdot 200 \times 100\text{kWh}) = 0,5 \text{ kr/kWh}$	
<i>Fordele</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simpel og robust teknologi</li> <li>• Meget lidt vedligehold</li> <li>• Elpatroner kan afgive høj effekt, hurtig regulering</li> </ul>	

<i>Ulemper</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forøget varmetab</li> <li>• Måske ulemper for proceskontrol</li> <li>• Tilkalkning (ved brugsvand)</li> </ul>
<i>Teoretisk energiindhold</i>	$E = M * C_p * dT$ M= masse af lagermedie Cp= specifikke varmekapacitet for medie(vand) dT= temperaturinterval

Eksempelpriser fra leverandørkatalog:

Simpel beholder på 2m<sup>3</sup>: kr 24.000

Simpel beholder på 5m<sup>3</sup>: kr 37.000

<b>Betongulv i fryselager</b>	<i>Kap.100 kWh (en fuldlast-time)</i>	<i>Kap. 1000 kWh (10 fuld-lasttimer)</i>
<i>Gulvareal hvor de øverste 5 cm beton antages at kunne variere 5 K</i>	700 m <sup>2</sup>	7000 m <sup>2</sup>
<i>Pris cirka</i>	Styring af kompressor: 10.000 kr	Styring af kompressor: 10.000 kr
<i>Holdbarhed</i>	Cirka 10 år (uændret i.f.t. reference)	
<i>"Lagerpris"</i>	10000kr/(10 år*200x100kWh)= 0,05 kr/kWh	
<i>Fordele</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simpel og robust teknologi</li> <li>• Kun lidt vedligehold</li> <li>• Forbrugsprofil passer godt til PV</li> </ul>	
<i>Ulemper</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Øget energiforbrug ved nedkøling</li> <li>• Måske forringet produktkvalitet</li> <li>• Kompressorstørrelse kan være en begrænsning</li> </ul>	
<i>Teoretisk energiindhold</i>	$E = M * C_p * dT$ M= masse af lagermedie (gulv) Cp= specifikke varmekapacitet for medie (beton+evt varer) dT= temperaturinterval	

Eksempelberegning for fryselager

Nøgletal for energiforbrug						
	Kolerum					
Lagerstørrelse [m <sup>3</sup> ]	ca. 10	under 300	ca. 300	ca. 1.000	ca. 5.000	ca. 15.000
Energiforbrug [kWh/år/m <sup>3</sup> ]	150-250	50-150	40-50	20-30	12-20	8-16
	Frostrum					
Lagerstørrelse [m <sup>3</sup> ]	ca. 10	ca. 100	1.-2.000	4.-5.000	10.-20.000	20.-30.000
Energiforbrug [kWh/år/m <sup>3</sup> ]	500-600	300	140-200	80-120	40-60	40-50
	Indfrysning					
Udstyrstype	Pladefryser		Spiralbåndfryser		Tunnel	
Energiforbrug [kWh/ton]	75-90		120-150		100-150	

NB! Værdierne må kun anvendes til overslag og opfattes som fingerpeg om typisk størrelsesorden.  
Kilde: Kølebranchens Kvalitetssikringsordning /4/

Eks. fryselager 5 m højt, 1000 m<sup>2</sup> = 5000 m<sup>3</sup>

Energiforbrug 80 kWh/m<sup>3</sup> x 5000m<sup>3</sup> = 400 MWh. Middel effekt 46 kW, anslået kompressoreffekt 100 kW

<b>Oppumpning af trykluft-tank</b>	<i>Kap. 100 kWh(en fuldlast-time)</i>	<i>Kap. 1000 kWh(10 fuldlast-timer)</i>
<i>Volumen (Antaget adiabatisk proces 10 til 40 bar)</i>	64,9 m <sup>3</sup>	649 m <sup>3</sup> (Formentlig opdelt på flere enheder)
<i>Pris cirka</i>	Overslag 0,3 mill	Overslag 5 mill
<i>Holdbarhed</i>	Cirka 10 år (uændret i.f.t. reference)	
<i>"Lagerpris"</i>	300000kr/(10 år*200x100kWh)= 1,5 kr/kWh	
<i>Fordele</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simpel og robust teknologi</li> <li>• Kun lidt vedligehold</li> </ul>	
<i>Ulemper</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forøget tryktab</li> <li>• Måske ulemper for proceskontrol</li> <li>• Begrænset ladeeffekt (kompressor for lille i forhold til solcelleanlægget)</li> </ul>	
<i>Teoretisk energiindhold</i>	$E = p_{høj} * V * \ln(p_{høj}/p_{lav})$ P er trykket i Pa V er tankvolumen i m <sup>3</sup>	

Eksempelpriser på beholdere fra leverandørkatalog:

1 m<sup>3</sup>, 18 bar: kr 54.000  
 10m<sup>3</sup>, 16 bar: kr 160.000  
 0,3 m<sup>3</sup>, 64 bar: kr 37.000

<b>Batterisystem (Li-Ion)</b>	<i>Kap.100 kWh(en fuldlast-time)</i>	<i>Kap. 1000 kWh(10 fuldlast-timer)</i>
<i>Nominel kapacitet</i>	125 kWh	1250 kWh
<i>Pris cirka</i>	Overslag 0,5 mill*)	Overslag 4 mill*)
<i>Holdbarhed</i>	Cirka 10 år	
<i>"Lagerpris"</i>	$500000\text{kr}/(10\text{ år}\cdot 200\times 100\text{kWh})= 2,5\text{ kr/kWh}$	
<i>Fordele</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte lagring uden forsinkelse</li> <li>• Høj effekt</li> <li>• Kun lidt vedligehold</li> </ul>	
<i>Ulemper</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kræver særlig inverter</li> <li>• Måske brandrisiko</li> </ul>	
<i>Teoretisk energiindhold</i>	Direkte ellagring med ca. 90% virkningsgrad	

\*)Priser haves mest for mindre anlæg, der er regnet med relativ lavere priser på store installationer som her. Batterier falder p.t. hurtigt i pris.

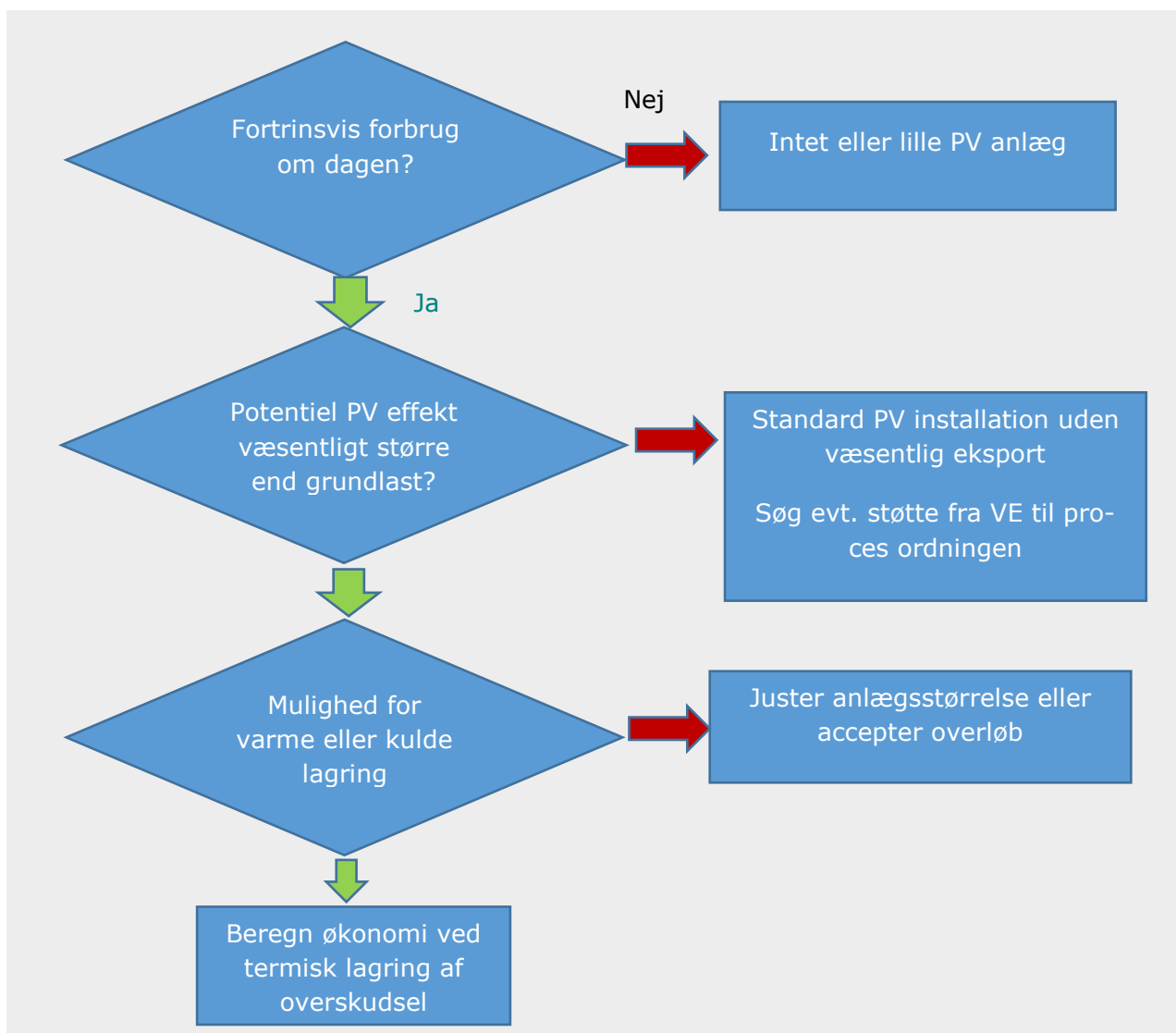
Økonomieksemplerne viser at der er store forskelle på den nødvendige investering og at det formentlig kun er styring af køle/fryse lager samt evt. eksisterende tank med en ny elpatron der udgør realistiske muligheder for energilagring. For de andre teknologier er lagringsprisen så høj at det er bedre at sælge til nettet.

### Beslutningsværktøj

Man kan med fordel stille følgende spørgsmål når virksomheden overvejer at anskaffe et solcelleanlæg

- Følger elforbruget nogenlunde solindstrålingen (over et døgn?)
- Er der stor forskel på forbruget sommer og vinter? Er der f.eks. sommerlukket?
- Kan man udligne forbrug mellem weekender og hverdage?
- Er det areal der er til rådighed til solceller stort nok til at man nogensinde kan producere mere end minimumsforbruget?
- Kan overskud bruges til komfortenergi hvor der er afgift på købt el?
- Kunne pengene bruges bedre på energieffektivisering?





Forenklet fremstilling af beslutningsproces vedrørende solcelleanlæg til virksomheder

## 12. Sammenfatning

Energilagring i forbindelse med industrielle processer er et omfattende og kompliceret emne, men rapporten viser dog at der er flere realistiske muligheder for at afsætte overskydende el fra solcelleanlæg i virksomheder. De teknisk og økonomisk mest interessante muligheder synes at kunne findes i termiske processer, idet man kan implementere simple og robuste løsninger som ikke behøver at have indflydelse på produktionsprocesserne. De dyreste tiltag - så som lagring i trykluft op potentiel energi - er prismæssigt på højde med dedikerede batterilagre og giver derfor næppe mening.

For mange virksomheder vil elforbruget time for time overstige elproduktionen fra eget solcelleanlæg, da der er begrænset tagareal til rådighed for solceller. I praksis vil mange virksomheder derfor kunne aftage solcelleproduktionen selv, og lagringsproblematikken bliver derfor ikke aktuel.

I fremtidens fleksible elsystem kan forskydning af energiforbruget ved hjælp af de omtalte teknologier imidlertid få fornyet interesse, men i så fald skal der andre og kraftigere økonomiske incitamentter til i form af stærkt differentierede priser eller betaling for at stille kapacitet til rådighed.

### **13. Referencer**

- 1) Kortlægning af potentialet for fleksibelt elforbrug i industri, handel og service. Udarbejdet af Ea Energianalyse for Energinet.dk
- 2) Elforbrugspaneler: <http://www.elforbrugspanel.dk/Pages/Forsiden.aspx>
- 3) Trykluft: <http://www.opfind.nu/blog/2010-august/energilagre-med-trykluft.aspx>
- 4) Svinghjul: <http://www.opfind.nu/blog/2010-juli/energilagring-i-svinghjul.aspx>
- 5) Potentiel energi <http://www.opfind.nu/blog/2010-juli/lagring-af-beliggenhedse-nergi.aspx>
- 6) [http://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Forskning%20-%20PSO-projekter/RDD%20Energy%20storage\\_incl%20app.pdf](http://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Forskning%20-%20PSO-projekter/RDD%20Energy%20storage_incl%20app.pdf)