

Marknadsöversikt för solcellsmoduler, växelriktare, infästningsanordningar och kompletta system

Innehållsförteckning

1	Inledning	2
2	Solcellsmoduler.....	3
2.1	Allmänt om solcellsmoduler	3
2.1.1	Om toppeffekt och energiproduktion.....	4
2.1.2	Om skuggning och bypass-dioder	5
2.1.3	Om temperatur och ventilation	6
2.1.4	Om förväntad livslängd och degradering.....	6
2.2	Olika modultyper	6
2.2.1	Traditionella glas-polymermoduler	6
2.2.2	Traditionella glas-glasmoduler.....	7
2.2.3	Bifacialmoduler	8
2.2.4	Multi-diod moduler	8
2.2.5	Halvcellsmoduler	8
2.2.6	Moduler för byggnadsintegrering	9
2.3	Olika celltekniker	13
2.3.1	Kiselceller – första generationen solceller	13
2.3.2	Tunnsfilmssolceller – andra generationens solceller.....	14
2.3.3	Tredje generationen solceller	16
2.3.4	Tandemceller och multi-junctionceller.....	16
2.4	Tillämpningar.....	17
3	Växelriktare	17
3.1	Allmänt om växelriktare	17
3.1.1	Ursprung, pris och kvalitet	17

RISE Research Institutes of Sweden AB

Postadress
Box 857
501 15 BORÅS

Besöksadress
Brinellgatan 4
504 62 BORÅS

Tfn / Fax / E-post
010-516 50 00
033-13 55 02
info@ri.se

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte RISE i förväg skriftligen godkänt annat.

3.1.2	Kapacitet och effektivitet	18
3.1.3	Växelriktarens placering.....	18
3.1.4	Växelriktarens två huvuduppgifter.....	18
3.1.5	Driftövervakning och kommunikation	19
3.1.6	Garantier	20
3.2	Strängväxelriktare.....	20
3.3	Moduloptimerare och mikroväxelriktare	20
3.4	Hybridväxelriktare	21
3.4.1	Hybridväxelriktarens funktioner	22
4	Takinstallation, infästningsanordningar och taktyper.....	22
5	Systemaspekter.....	23
5.1	Stöd vid val av solcellsmodulstyp	23
5.2	Skuggningens relevans för komponentval och optimering av teknisk lösning.....	25
5.3	Stöd vid val av växelriktartyp	25
5.4	Om den optimala storleken för en solcellsanläggning.....	26
5.5	Hur mycket skiljer sig energiproduktionen mellan olika tekniska lösningar?.....	27
5.6	Priset för ett villasystem.....	27
5.7	Klimat- och hållbarhetsaspekter.....	28
5.8	Avveckling av solcellsanläggningar	28
5.8.1	Krav på återvinning.....	28
6	Marknaden för villaanläggningar.....	29
6.1	Installatörerna.....	29
6.2	Ansvarsförhållanden och säkerhetsfrågor.....	30
6.3	Forum för mer information.....	31

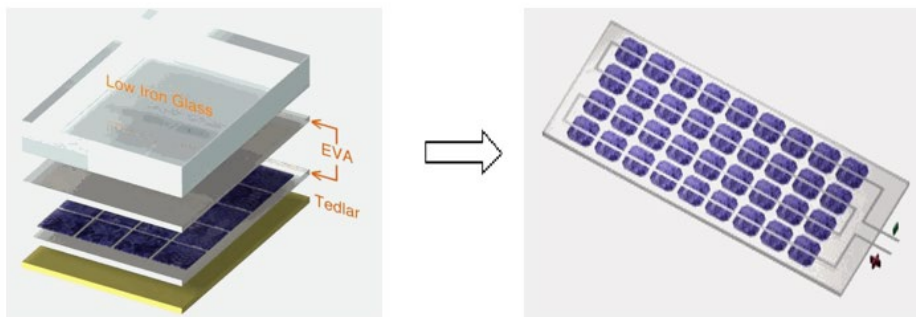
1 Inledning

RISE har fått i uppdrag av Energimyndighetens Testlab att sammanställa en översikt över tillgängliga produkter och system för den svenska villamarknaden, såväl relativt mogna och etablerade som nya produkter och system. Rapporten beskriver olika celltekniker, olika typer av solcellsmoduler samt olika typer av växelriktare. Aspekter på takmontering och monteringsutrustning berörs endast översiktligt och med hänvisning till en aktuell och utförlig ”takguide”. Mer handfast vägledning för konsumenter avhandlas i ett avsnitt om systemaspekter och val av komponenter och ett som beskriver hur villamarknaden för solel fungerar. Även här hänvisas i vissa delar vidare till Energimyndighetens solelportal för fördjupning.

2 Solcellsmoduler

2.1 Allmänt om solcellsmoduler

En solcellsmodul ska vara en hanterbar produkt som kombinerar ett flertal solceller och skyddar dem mot fukt och annan extern påverkan. En solcellsmodul består typiskt av ett lager med solceller och kontakter som lamineras mellan en glasskiva på framsidan och en baksida av varierande material. Dessa laminat ramas oftast in i en aluminiumram som ger extra styrka och skydd mot kantstötningar. Som vi kommer att se i följande avsnitt finns det många olika undantag från denna grundkonstruktion. Framsidan är inte alltid av glas, vissa typer saknar ram och så vidare, men den beskrivna grundkonstruktionen är den absolut vanligaste i såväl villasystem som i gigantiska solcellsparker. Det innebär att denna modultyp tillverkas i enorma kvantiteter världen över vilket gör att priset blir lågt och det är därmed också den modultyp som ger flest watt och kilowattimmar per investerad krona. Som fastighetsägare fäster man ofta stor vikt vid estetiken. Man vill helt enkelt att hustaket ska se bra ut även med solceller installerade och är därmed beredd att betala lite mer, vilket innebär att andra typer av produkter nu blir allt vanligare.



Figur 1 Till vänster skikten i en modul med kristallina kiselceller, till höger de seriekopplade cellerna¹

I Tabell 1 och Tabell 2 sammanfattas typiska verkningsgrader och prisuppgifter för de vanligaste modultyperna och solcellsteknikerna². De högre värdena, exempelvis 22% för monokristallint kisel, representerar de mest effektiva solcellsmoduler som går att köpa inom respektive teknik. Priset på dessa moduler i framkant av utvecklingen är också det högsta, räknat i kronor per Watt, jämfört med mindre effektiva moduler.

Tabell 1 Kommersiella solcellstekniker och några ungefärliga nyckeltal.

Celltyp	Verkningsgrader för kommersiella solcellsmoduler
	[%]
Monokristallint kisel	18-22
Polykristallint kisel	16-20
Kadmiumtellurid (CdTe)	14-18
CIS/ CIGS	14-16
Amorft/mikro kisel	8-12

¹ Bild: SolEl-programmet

² Källa: <https://www.pvxchange.com/de/>

Tabell 2 Skillnaden i pris per kilowatt topp effekt mellan olika typer av kiselmoduler (källa: pvXchange.com)

Modultyp	Typisk verkningsgrad	Prisindex (standardmodul = 100 %)
Standard kiselmodul (poly eller mono)	16-18%	100%
Lågpris (t.ex. andra sortering, låg effekt, konkursbon)	-	76%
Helsvarta moduler (mono, ibland poly)	12-20%	140%
Högeffektiva moduler (PERC, HIT, n-typ)	18% och uppåt	128%
Bifacialmoduler	-	152%

2.1.1 Om topp effekt och energiproduktion

Varje solcellsmodul har en viss topp effekt (peak power på engelska) som anges i kWp. Det är den maximala effekten som modulen kan leverera under standardiserade testförhållanden (STC – Standard Test Conditions) enligt Tabell 3. Tillverkaren mäter modulens ström-spänningskurva vid STC och den maximala effekten (ström x spänning) som modulen kan uppnå avgör med vilken effektklass modulen märks (märkeffekten). Tillverkarna delar i regel upp sina solcellsmoduler i effektklasser som räknas upp med 5W per klass. Nuförtiden är det vanligast att tillverkare tillämpar så kallad plus-sortering: det vill säga att endast solcellsmoduler med en topp effekt motsvarande effektklassen eller högre (+3% eller +5%) får ingå i en viss effektklass.

Tabell 3 Standardiserade testförhållanden, STC, som används för att definiera en solcellsmoduls topp effekt

Storhet	Värde
Celltemperatur	25°C
Instrålning	1000 W/m ²
Ljusspektrum	AM 1.5 ³

Att veta märkeffekten på en modul är relevant i flera avseenden:

- Jämförbarhet – märkeffekten kan jämföras för moduler från olika tillverkare och även moduler med olika solcellstekniker. Även olika anläggningar kan jämföras, se Utbyte.
- Utbyte – solelproduktion från en solcellsanläggning kan normeras för anläggningens storlek (installerad effekt = summan av modulernas märkeffekt). Sedan kan olika anläggningars normerade elproduktion, eller utbyte jämföras. Utbytet anges då vanligtvis i kWh/kWp och vanliga värden för svenska förhållanden och någorlunda god orientering är 850 – 950 kWh/kWp.

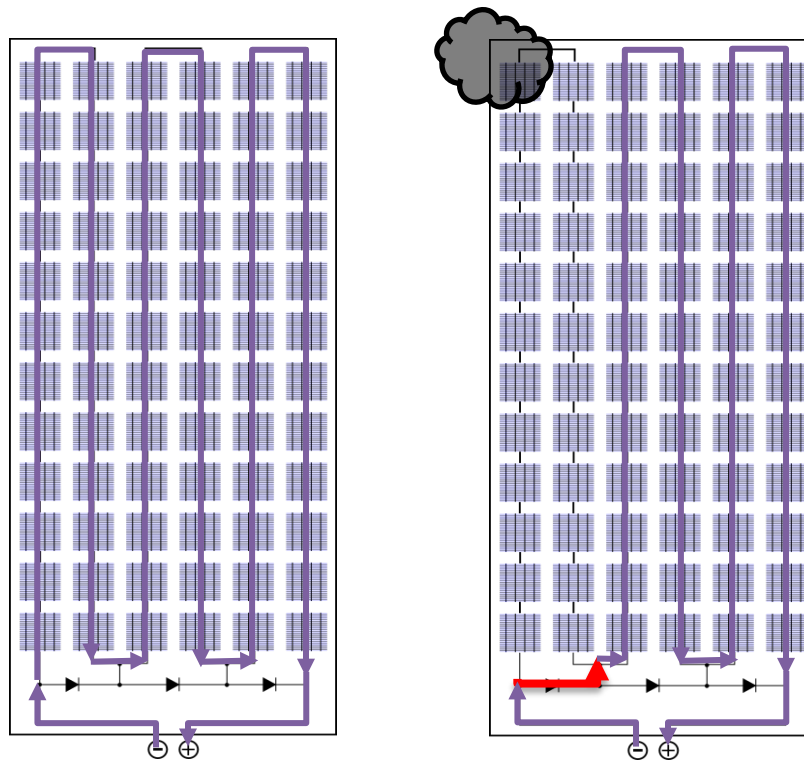
³ AM 1.5 står för AirMass 1.5 och är spektrumet för solljus som har rest genom 1,5 gånger atmosfärens höjd, vilket innebär en vinkelrät instrålning på en yta som är lutad 37° från vågrätt.

- Kostnad – solcellsmodulernas pris är ett pris per kWp. Man betalar alltså för en viss märkeffekt.
- Effektgaranti – varje solcellsmodul kommer med en effektgaranti. Effekterna som garanteras efter X antal år är relaterade till modulens märkeffekt (inte till varje enskild moduls toppeffekt).

2.1.2 Om skuggning och bypass-dioder

Även en mindre mängd skuggning på solcellsmoduler kan ha en stor negativ effekt på energiutbytet. För att minska skuggningspåverkan används så kallade bypass-dioder eller förbikopplingsdioder i de flesta typer av solcellsmoduler.

I princip är det den mest skuggade cellen i en solcellsmodul som begränsar strömmen och därmed effekten som kommer från modulen. Seriekopplas modulen i en sträng med andra moduler så skulle den mest skuggade cellen begränsa strömmen från alla seriekopplade moduler – om det inte vore för bypass-dioderna.



Figur 2 Illustration av bypass-diodernas funktion i en standardmodul med tre bypass-kretsar, där pilarna visar strömmens väg: i den oskuggade modulen (t.v.) går strömmen genom varje cell som bidrar med ca 0,5V. I modulen där (minst) en cell skuggas (t.h.) gör spänningsfallet över den skuggade bypass-kretsen att bypass-dioden öppnas och strömmen löper förbi cellerna i kretsen. Spänningen och effekten från den skuggade modulen blir 2/3-del av den oskuggade modulens spänning/effekt.⁴

En standardmodul använder normalt tre bypass-dioder som delar in solcellsmodulen i tre slingor. Om en eller flera av cellerna i dessa slingor skuggas skapas ett spänningsfall som gör att bypass-dioden öppnar och släpper igenom strömmen i solcellssträngen. Man tappar då

⁴ Bild: RISE (M. van Noord)

endast bidraget från de 20 celler som bypass-dioden överbryggar och påverkar inte resten av modulen eller andra seriekopplade moduler. Det finns också andra, kompletterande metoder för att hantera skuggningsproblematiken, se avsnitt 2.2.4 och 3.3.

Utöver att minska skuggningspåverkan skyddar bypass-dioderna även de skuggade cellerna från att bli alltför varma. Varma (delar av) celler, så kallade ”hot-spots”, kan orsaka skador på modulen och snabbar på åldringsprocessen.

Mer om skuggningshantering finns i avsnitt 5.2 och i Skuggningshandboken⁵.

2.1.3 Om temperatur och ventilation

Samtliga kommersiella solcellstekniker bygger idag på halvledarteknik. Det gör att deras verkningsgrad varierar med temperaturen på solcellen. Ju högre celltemperatur, desto lägre effekt ger cellen. Graden av temperaturkänslighet beror främst på cellteknik (se mer i avsnittet om olika celltekniker), men i mindre grad påverkar även kvalitet och utformning på modulen. En standardmodul tappar ungefär 0,4% (relativt) i uteffekt med varje grad temperaturhöjning på cellerna. Å andra sidan ökar effekten också med cirka 0,4% när celltemperaturen sjunker en grad. En modul vars angivna topp effekt är 300 watt vid 25 °C kommer då att ge cirka 312 watt vid 15 °C och cirka 288 watt vid 35 °C. Praktiskt innebär detta att många anläggningar får sina absoluta toppnoteringar under kalla klara vårdagar och inte mitt i sommaren.

För att optimera solelproduktionen är det fördelaktigt att hålla en god ventilation runt och särskild bakom solcellsmodulerna. Studier har visat att en luftspalt på cirka 10 cm mellan moduler och takyta gör stor skillnad för celltemperaturen. Flera modultillverkare föreskriver eller rekommenderar 10 cm luftspalt bakom modulerna i sina manualer med hänvisning till ventilation eller brandklassning.

2.1.4 Om förväntad livslängd och degradering

En solcellsmodul som uppfyller kvalitetskraven enligt standarderna EN IEC 61215 och 61730 antas ha minst 30 års livslängd. I ekonomiska beräkningar antar man ibland en årlig minskning av verkningsgraden till följd av åldring på i storleksordningen 0,3-0,5% (relativt) per år. Med 0,5% per år har alltså en modul med 18% verkningsgrad i nyskick efter 30 år landat på $18 \cdot (1 - 0,005 \cdot 30) = 15,3\%$. Värt att nämna i sammanhanget är att vårt nordiska klimat, med lägre instrålning och temperatur än på många andra platser på jorden är en fördel när det kommer till livslängdsfrågor. Hög temperatur och hög instrålning är nämligen de två mest avgörande faktorerna som gör att en solcellsmodul åldras. Antagandet om 0,5% reduktion av verkningsgraden per år baseras på erfarenheter från betydligt soligare och varmare länder än Sverige och är därför troligen i överkant vilket har bekräftats i några fall där man mätt effektivitet på gamla moduler. Solcellerna i en svensk anläggning kan alltså leva betydligt längre än de 30 år man normalt räknar med i ekonomiska beräkningar.

2.2 Olika modultyper

2.2.1 Traditionella glas-polymermoduler

Dagens ”standardmodul” är en glas-polymermodul där solcellerna alltså är laminerade mellan en glasskiva och en polymerfolie, också kallad ”backsheet”. Det finns olika polymerfolier som oftast är gjorda av olika plastskikt som innehåller exempelvis polyester, polyvinylfluorid, eller polyamid.

Polymerfolier är billigare och lättare än glas och ändå bra på att stänga ute fukt och smuts.

⁵ Skuggningshandbok (Energiforskrappport 2017-385); Författare: Anna Bengtsson, Erik Holm, David Larsson, Björn Karlsson; <https://www.energiforsk.se/program/solel/rapporter/skuggningshandbok-2017-385/>

Glas-polymermoduler har vanligtvis aluminiumram, men används ibland också utan ram. För mer information om tillämpning av ramlösa moduler hänvisas till nästa avsnitt, om glas-glasmoduler.

I dagsläget innehåller den vanligaste modulvarianten 60 solceller på cirka 16 x 16 cm, placerade i 6 rader om 10 celler. Denna branschstandard gör att modulernas dimensioner är väldigt lika mellan tillverkarna och cirka 165 x 100 cm. Många företag tillverkar även moduler med 72 solceller (6 rader om 12 celler) och i mindre grad förekommer även 48-cells moduler (6 rader om 8 celler).

Glas-polymermoduler kommer i regel med mellan 5 och 10 års produktgaranti och en effekttgaranti som garanterar minst 80% av märkeffekten efter 25 år.

2.2.2 Traditionella glas-glasmoduler

Glas-glas moduler, är solcellsmoduler där solcellerna är monterade emellan två glasskivor, till skillnad från reguljära kiselmoduler där endast ett glas täcker framsidan av solcellsmodulen medan baksidan skyddas av en polymer, ett så kallat "backsheet".

Dubbla glasskikt bidrar till ökad mekanisk stabilitet och, enligt flera tillverkare, längre livslängd då solcellsmaterialet skyddas bättre mot exempelvis mikrosprickor⁶ och fuktintrång. Tillverkare pekar även på minskade brandrisker. Leverantörerna erbjuder vanligtvis längre produktgarantier för glas-glas jämfört med glas-polymermoduler – ända upp till 30 år. Även effekttgarantierna är vanligtvis både längre och på en högre nivå, typiskt ca 5 år längre (30 år) och 7 procentenheter högre (87%).

Glas-glas moduler finns både med aluminiumram och utan ram. Ramlösa moduler (även kallad laminat) tillåter/kräver andra typer av montagesystem än de med aluminiumram. Laminat kan till exempel användas i profilsystem för glasfasader eller glastak. Ofta behöver laminat också en monteringslösning som ger extra styvhet, vilket är en viktig funktion hos ramen i en vanlig modul.

Glas-glasmoduler kan ha en färgad baksida, vanligtvis vit eller svart, precis som glas-polymermoduler. Det finns också produkter som utnyttjar baksidans transparens och släpper igenom en del ljus mellan solcellerna och vid modulkanterna. Vissa tillverkare har serietillverkade eller kundanpassade produkter med extra stora mellanrum mellan solcellerna för att öka ljusgenomsläppet. Ökat ljusgenomsläpp kan vara av intresse om man använder solceller som enda taktäckning, till exempel på ett växthus eller en carport. Det ökade ljusgenomsläppet gör dock att effekten per kvadratmeter modul blir lägre och kostnaden per installerad watt blir högre. Då dessa produkter i regel används med synlig baksida har de vanligtvis även en annan lösning för elkablarna. Istället för att det sitter en kopplingsdosa på baksidan av en solcell så utgår kablarna från modulens sida eller i närheten av modulkanten.



⁶ Mikrosprickor är små sprickor i solcellen som kan uppstå på grund av t.ex. stötar, skakning eller termisk påverkan. Sprickorna syns inte med blotta ögat, men kan påverka modulernas prestanda, framförallt på sikt.

Figur 3 Glas-glas solcellsmoduler med varierande mellanrum mellan cellerna i Akademie Mont-Cenis ⁷

2.2.3 Bifacialmoduler

Solcellsmoduler kan även vara utformade så att de kan producera solcell från både fram- och baksida av solcellsmodulen. Dessa moduler använder solceller som fångar upp ljus från båda sidor och de kallas därför bifacialmoduler eller ibland ”dubbelsidiga moduler”. De finns i olika utföranden, med aluminiumramar med transparent backsheet eller som glas-glas med eller utan ram och kan använda både mono- och poly-kristallint kisel. Bifacialmoduler är semitransparenta, och ljusgenomsläppligheten varierar med separationen mellan cellerna som i sig är ogenomskinliga. Det finns ramlösa glas-glasmoduler där cellernas baksida exponeras för ljus, utan att de för den skull är bifacialmoduler.⁸

Kopplingsboxen är ofta placerad längs kanten av modulen för att minimera dess skuggoeffekt.

En viktig egenskap hos bifacialmoduler att kolla upp är ljuskänsligheten på baksidan, ibland också kallad ”bifaciality” eller ”bifacialitet” på svenska. I bästa fall är baksidan nästan lika effektiv (ca 90%) på att omvandla ljus till el, men det finns också produkter som ligger betydligt lägre (under 50%).⁹

Bifacialmoduler är mest fördelaktiga i tillämpningar där även baksidan kan belysas direkt av solen, eller där baksidan utsätts för mycket reflekterande ljus från omgivningen. Det kan handla om fall där solcellsmoduler monteras vertikalt som räcken, eller vid montering i upphöjda, lutande rader på ljusa underlag och i snörika omgivningar. Vid val av monteringslösning för bifacialmoduler är det viktigt att baksidan på modulerna skymms så lite som möjligt av montage delarna.

När solcellsmodulerna monteras i ett normalt montagesystem för lutande tak, det vill säga i takfallet på 10-15 centimeters avstånd från takytan är nyttan med bifacialmoduler mycket liten.

Beroende på hur de installeras och till vilken grad omgivningen reflekterar solinstrålningen så ökar modulens totala verkningsgrad med upp till 20%. Någon studie har med vitt grus som underlag kunnat visa upp till 30%, men orealistiskt höga siffror förekommer ibland i marknadsföringen. Detta är något konsumenter behöver vara uppmärksamma på.. Flera tillverkare erbjuder bifacial-moduler, så som till exempel LG, LUXOR, PPAM m.fl.

Priset för bifacialmoduler är ca 50% högre än för reguljära kiselmoduler (se även Tabell 2 i avsnitt 2.1).

2.2.4 Multi-diod moduler

Som beskrivits tidigare så använder vanliga kiselmoduler normalt tre bypass-dioder som delar in solcellsmodulen i tre slingor. För att ytterligare förbättra prestandan i partiellt skuggade moduler så finns moduler som har en bypass-diod för varje cell. Tillverkare av sådana moduler är exempelvis AE-solar. Även svenska Midsummer använder en bypass-diod per cell i sina flexibla tunnfilmmoduler.

2.2.5 Halvcellsmoduler

Flera av de större tillverkarna av solcellsmoduler erbjuder sedan något år tillbaka så kallade halvcellsmoduler, på engelska ”half-cell modules” eller även ”half-cut solar cell modules”. Modulerna använder kiselceller av halva standardstorleken, vilket blir ca 8 x 16 cm. På grund av sin mindre storlek är cellerna mer robusta och mindre känsliga för hotspots. De genererar en

⁷ Bild: M. van Noord

⁸ <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/04/what-are-bifacial-solar-modules/>

⁹ Outdoor Field Performance of Bifacial PV Modules and Systems (EU PVSEC 2017; J.S. Stein et al.)

lägre cellström, vilket bidrar till att minska de interna förlusterna i solcellsmodulen. De mindre cellerna tillåter förutom standardkonfigurationen, som har tre slingor, även en konfiguration där modulen med hjälp av tre by-pass dioder i mitten av solcellsmodulen delas in i sex olika slingor, vilket bidrar till en potentiellt bättre möjlighet att hantera skuggor.^{10 11}

Halvcellsmoduler kan fås från flera av de större modultillverkarna, så som Jinko Solar, Trina Solar och Hanwha Q cells, m.fl.

2.2.6 Moduler för byggnadsintegrering

Vanliga solcellsmoduler är rationella i tillverkning och installation. Utseendet på dessa passar dock inte alltid byggnadens arkitektur eller köparens smak. Sedan flera år har en del tillverkare försökt anpassa sina produkter i storlek och utseende för att bättre passa in i olika förutsättningar. I detta avsnitt presenteras några av de vanligare varianter som erbjuds i Sverige.

En utmaning som nästan alla modullösningar för byggnadsintegrering har gemensamt är att de inte är lika välventilerade som vanliga moduler. Det beror på att de är mer inbyggda i tak- eller fasadkonstruktionen. Lite högre celltemperaturer och därmed något minskad energiproduktion får man vanligtvis räkna med som en negativ följd av en snyggare anläggning, men allt som bidrar till bättre ventilation är bra.

2.2.6.1 Reguljära moduler för byggnadsintegration

Det vanligaste sättet att integrera solceller i tak är troligen att låta reguljära moduler av standardmåtten cirka 1,6 gånger 1 meter ersätta takpannor. Solcellsmodulerna monteras i samma nivå som takpannor på hela eller en del av taket. Under modulerna används vanligtvis en konstruktion med takpapp (pappkvalitet motsvarande underlagspapp eller bättre, UV-beständig om semitransparenta moduler används) och läkt. Solcellsmodulerna kan vara helt vanliga kiselmoduler (t.ex. 60-cells glas-polymermoduler) rakt av, men inte sällan används varianter som är mycket lika reguljära moduler, exempelvis med anpassade modulramar eller anpassad storlek. Det finns integrerade standardprodukter med både kisel- och tunnfilmssolceller.



Figur 4 Solcellstak med integrerade reguljära moduler¹²

¹⁰ <https://news.energysage.com/half-cut-solar-cells-overview/>

¹¹ <https://www.pv-magazine.com/2018/03/14/qa-jinkosolar-discusses-half-cut-cells-multi-busbars-and-bifacial-technology/>

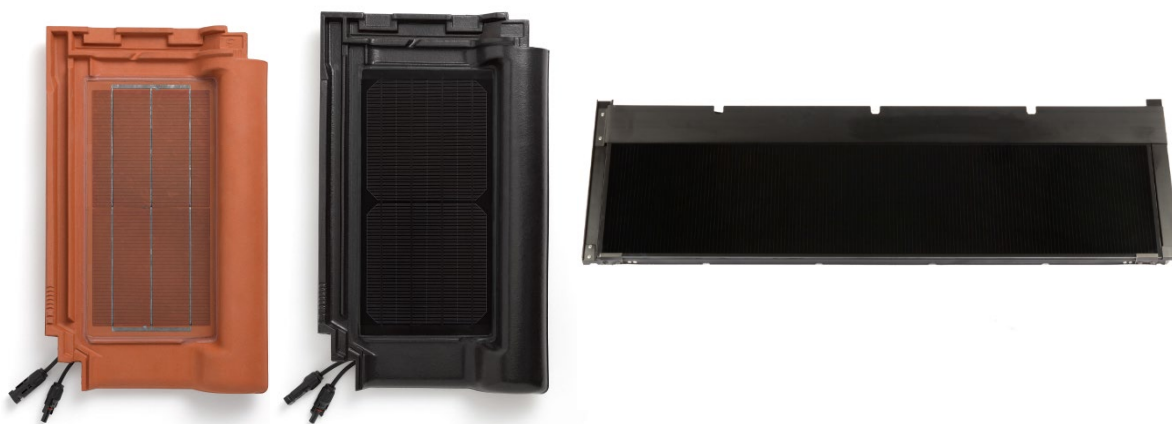
¹² bild: SolTech Energy

Vid användning av byggnadsintegrerade reguljära moduler på tak är det viktigt att övergångarna från solcellstak till annat takmaterial (eller till takkant, taknock och takfot) konstrueras på ett bra sätt så att klimatskyddet håller. Taktäckningar uppbyggda av solcellsmoduler i standardstorleken 1,6 x 1 meter finns tillgängliga från t.ex. MeraSol, Soltech Energy och Solitek.

Utöver solcellsmoduler integrerade i tak finns det även fasadlösningar som använder reguljära moduler. Här är det vanligtvis monteringslösningen som anpassas till modulerna, så att dessa blir det yttersta skiktet på en ventilerad fasadlösning. På stora fasader kan det vara lämpligt att använda glas-glasmoduler (kisel eller tunnfilm) för att uppnå motsvarande säkerhetsglas och för att minska mängden brännbart material i modulerna. Med säkerhetsglas menas att glaset, om det krossas, fortfarande hänger samman genom plastmaterialet som glaset lamineras med och glassplitter kan därmed inte falla ner och göra skada.

2.2.6.2 Skiffer- och takpaneliknande moduler

Skiffertak och takpannetak har ett typiskt utseende som flera tillverkare försöker efterlikna med hjälp av mindre solcellsmoduler i olika storlekar. Storleken på produkterna varierar från moduler som motsvarar en (större) skifferplatta eller takpanna till sådana som motsvarar 5-6 takpannor på rad. Att ha många små moduler som alla behöver monteras och kopplas ihop innebär mycket merarbete jämfört med en vanlig solcellsinstallation. Det är därför vanligare med sådana moduler som ersätter ett antal takpannor och minskar något på antalet moduler på ett tak.



Figur 5 Takpannemoduler som ersätter en kupad takpanna (t.v. och mitten) eller som ersätter ett flertal plana takpannor (t.h.)¹³

En annan aspekt på att ha många små moduler är att det blir många kopplingar mellan moduler, som görs med snabbkontakter. Dessa snabbkontakter skall vara ordentligt monterade med specialtillverkade verktyg för att ge en god och säker elektrisk kontakt. Vid bristande kontakt finns risk för värmeutveckling och i värsta fall ljusbågar som kan leda till brand. Ju fler kontakter som finns, desto större är risken att någon av dessa har brister.

Skiffer- eller takpaneliknande moduler monteras vanligtvis på läkt, som möjliggör viss ventilation under modulerna. Vid montering ska stor vikt läggas på ventilationen under modulerna och vid nock.

¹³ Bilder: S:t Eriks, SolTech Energy

Solcellsskiffer eller -takpannor erbjuds idag i Sverige av t.ex. Midsummer/Benders, Soltech Energy och S:t Eriks.



Figur 6 Solcellstakpannor installerade på tak - från vänster till höger: flexibel tunnfilm utanpå kupade takpannor (se även nästa avsnitt), kupade solcellspannor, släta solcellspannor¹⁴

2.2.6.3 Flexibla moduler

Glasskivan eller -skivorna i en standardmodul kan innebära vissa begränsningar i tillämpningen. Ibland väger modulerna för mycket för ett visst tak, i andra fall kanske taket har en böjd form som ska följas. I sådana fall kan det vara intressant med flexibla solcellsmoduler som använder en transparent plast på framsidan och en polymerfolie eller möjligen en metallfolie på baksidan.

Flexibla moduler har ingen ram och är endast ca 0,5 cm tunna, medan vikten är ca 3 kg/kvm (jämfört med ca 20 kg/kvm för glas-polymermoduler inkl. monteringsystem). Tunnfilmceller lämpar sig bättre för flexibla moduler än kristallina kiselceller, då de sistnämnda är bräckliga.

En vanlig tillämpning av flexibla solcellsmoduler är att dessa limmas på papptak eller duktak (TPO, EPDM). De kan även limmas på falsade plåttak eller bandplåt, se 2.2.6.4.

Flexibla moduler monteras vanligtvis utan luftspalt bakom modulerna och de kan bli mycket varma i direkt solljus. Om det är möjligt bör takkonstruktionen som modulerna limmas på vara ventilerad. Kontrollera också att takmaterialet klarar höga temperaturer. Det finns knappt några studier på vilka temperaturer som kan uppnås, men baserat på erfarenheter med vanliga moduler så är temperaturer på 80°C inte orimliga.

Flexibla moduler är inte så vanliga i Sverige men går att få från Midsummer och troligen även att importera från t.ex. Flisom. Under 2019 har Midsummer i samarbete med takpannetillverkaren Benders lanserat produkten ”Sunwave” som består av ett flexibelt ”skal” som monteras utanpå Benders vanligast betongpanna. En sådan modul täcker fem takpannor och effekten är cirka 110 watt per kvadratmeter, vilket motsvarar 11% verkningsgrad, se Figur 6.

¹⁴ Bilder: Midsummer, S:t Eriks, SolTech Energy

2.2.6.4 Falsade plåttak

En vanlig tillämpning av flexibla solcellsmoduler enligt förra avsnittet är på falsade plåttak eller bandplåt där modulen limmas på plåten mellan falsarna. Det erbjuds även färdiga plåtprodukter med förmonterade solcellsmoduler som kan vara flexibla moduler eller glas-foliemoduler.



Figur 7 Plåttak med integrerade tunnfilmsmoduler ¹⁵

Plåtprodukterna med flexibla solcellsmoduler har fördelen att de väger endast ca 2 kg per kvadratmeter mer än ett vanligt plåttak. Dessa moduler använder tunnfilmsteknik (CIGS-celler) och har kopplingsdosa och kontakter på framsidan av modulen, högst upp på taket, så att den göms undernockplåten vid installation. Solcellseffekten per yta solcellsplåt varierar mellan tillverkare men även baserat på hur solcellsmodulens bredd passar till plåtens bredd. Verkningsgraderna varierar mellan 6,5% - 11% för solcellsplåtens takyta. I dagsläget erbjuder Midsummer och Lindab denna produkttyp.

Den glas-foliemodul monterad på plåt som erbjuds på den svenska marknaden idag har monokristallina kiselceller med PERC-teknik (se förklaring av PERC i avsnitt 2.3.1.3). Det finns två varianter på plåten, en med ”klicksystem” (där plåten kläms i varandra) och en med dubbelfals (där plåten fästs i varandra genom dubbelvikning). Verkningsgraden per yta solcellsplåt varierar även här med produkttyp, från ca 11,5% för klick-plåten till ca 15% för dubbelfals-plåten. Plåt med solceller väger 15,5 kg per kvadratmeter tak. Denna produkt har kopplingsdosor med tre bypass-dioder och kontakter på baksidan av plåten. Modulerna kopplas ihop mellan takläkten. Denna produkt erbjuds i Sverige av Roofit Solar Energy genom Energihusgruppen EHG.

Solcellsplåten finns i några färgvarianter, där det är plåtens färg som varierar. Solcellsmodulen är alltid mörk så den resulterande färgvariationen på taket är inte särskilt stor.

Samtliga tillverkare kommunicerar att det går att gå på modulerna. I allmänhet vet vi dock att kiselceller är känsligare för fysisk belastning vilket kan resultera i mikrosprickor.

¹⁵ Bild: Midsummer

2.3 Olika celltekniker

Det finns idag en mängd olika solcellstekniker i olika stadier av mognad, och ofta som variationer på en och samma grundprincip. Bland de etablerade teknikerna dominerar sedan länge kiselcellerna som i dagligt tal bara benämns som mono- och polykristallina kiselceller.

Förutom kiselceller är även tunnfilmssolceller en sedan länge etablerad teknik. Tunnfilm är ett samlingsnamn för ett antal tekniker som har det gemensamt att de aktiva materialen utgör ytterst tunna skikt och tunnfilmstekniken är därmed mycket materialsnål. Amorft kisel, CIGS, CIS och CdTe är de vanligaste och av dem är idag kadmiumtellurid (CdTe) tillsammans med CIGS de vanligast förekommande och mest effektiva.

2.3.1 Kiselceller – första generationen solceller

Kristallina kiselceller är de absolut vanligaste på marknaden med en global marknadsandel på cirka 97%. Tekniken är mycket mogen, den första användbara kiselcellen tillverkades 1954. Sedan dess har verkningsgraden utvecklats från 4% till dagens nivå på runt 18% för reguljära moduler och uppåt 22% för högeffektiva moduler.

Bland kiselceller finns flera olika tekniker för att ytbehandla cellerna, applicera kontakter på cellerna eller för att kombinera kisel med andra material vilket ger upphov till nya beteckningar som HIT¹⁶- eller PERC¹⁷-celler. Nedan presenteras ett antal vanliga varianter på kiselceller.

2.3.1.1 p/n-typ celler

Utöver uppdelningen i mono- och polykristallina kiselceller finns det även en uppdelning i p- eller n-typ celler. Båda de sistnämnda typerna finns för polykristallina och monokristallina kiselceller. Skillnaden ligger i hur kiselkristallerna behandlas när solcellerna tillverkas. För p-typ celler blandas ("dopas") kisel med en annan atom som har en elektron mindre än kisel, vanligtvis bor. Dopar man kisel med atomer som har en elektron mer än kisel, vanligtvis fosfor, så får man n-typ kisel. För att få en fungerande solcell behövs både p- och n-lager. Därför injekteras översta lagret i p-typ celler sedan med atomer som har en elektron mer än kisel, och i n-typ celler med atomer med en elektron mindre.

En skillnad mellan dessa två typer är att n-typ kiselceller är mindre känsliga för föroreningar i materialet och följaktligen går det att spara bland annat energi när n-typ kisel renas. N-typ celler saknar också en typ av degradering (effektörlust) som p-typ celler påverkas av när de första gången placeras i solljuset, så kallad light-induced degradation (LID). P-typ celler tappar vanligtvis 2-3% av effekten på grund av LID.^{18,19}

Historiskt sett har de flesta kiselceller varit av p-typ, men eftersom det nu verkar enklare att tillverka högeffektiva solceller av n-typ kisel förutspår tillverkarbranschen att andelen n-typ kiselceller ökar från cirka 10% idag (2019) till drygt 40% om tio år.²⁰ Dock är experterna inte överens om vilken typ som på sikt kan ge de högsta verkningsgraderna.²¹

¹⁶ HIT = *Heterojunction with Intrinsic Thin-layer*

¹⁷ PERC = *Passivated Emitter and Rear Cell*, alt. *Passivated Emitter and Rear Contact*

¹⁸ https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/switch-from-p-to-n_10007072/

¹⁹ <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/07/the-difference-between-n-type-and-p-type-solar-cells/>

²⁰ <https://pv-manufacturing.org/wp-content/uploads/2019/03/ITRPV-2019.pdf>

²¹ <https://www.pv-tech.org/editors-blog/mono-vs-multi-n-type-vs-p-type-outlooks-from-pv-celltech-2018>

2.3.1.2 HIT-celler

En cellteknik som resulterar i höga verkningsgrader är HIT som utvecklades av Sanyo och numera tillverkas av Panasonic. HIT solceller kombinerar monokristallint kisel med amorft kisel, se 2.3.2, för att minska interna förluster i solcellen. Resultatet är en solcell med högre verkningsgrad och lägre temperaturkänslighet.

2.3.1.3 PERC-celler

Det som i vardagen brukar kallas PERC²² kan representera ett antal snarlika tekniker som all appliceras på kiselsolcellernas baksida för att öka verkningsgraden. Utöver själva PERC-tekniken (Passivated Emitter and Rear Cell/Contact) räknas oftast även PERL (Passivated Emitter and Rear Locally diffused) och PERT (Passivated Emitter and Rear Totally diffused) in under samma rubrik.

Solcellens baksida passiveras med ett extra materialskikt som ger tre positiva effekter. Till att börja med så reflekterar nu baksidan ljuset som inte fångats in på sin väg genom solcellen, vilket har två fördelar. Den delen av ljuset (de färger/våglängder) som kan fångas in av cellen går nu igenom cellen en gång till, vilket ökar sannolikheten för att det fångas in och omvandlas till el. Det ljuset (de färger/våglängder) som solcellen inte kan omvandla till el lämnar solcellen igen på framsidan istället för att absorberas av solcellens baksida och värma upp cellen. Som vi sett tidigare är en lägre celltemperatur gynnsam för solcellens verkningsgrad.

Till sist minskar den passiverade baksidan också sannolikheten att elektroner (negativ laddning) och hål (positiv laddning) möts vid baksidan och tar ut varandra, istället kan dessa nu bidra till en ökad ström från solcellen.

De tre beskrivna effekterna tillsammans ger PERC-solceller en högre verkningsgrad på typiskt ca 1%-enhet, till exempel från 20% till 21%. Detta är en viktig anledning till att solcellsindustrin förutspår att 70-75% av kiselsolcellerna kommer att vara PERC-solceller om 7-10 år (2026-2029).

En utmaning för PERC-celler som behöver hanteras tills dess är att de visar sig vara mer känsliga för snabb degradering (åldring) som minskar cellernas effekt eller verkningsgrad. Den främsta utmaningen är en degraderingsprocess som heter LeTID (Light and elevated Temperature Induced Degradation). Denna process har visat sig kunna leda till effektförluster på 5% eller uppåt 20-30% efter ett antal år. Höga celltemperaturer ökar risken och troligen även omfattningen på denna degradering. Även om en snabb degradering vanligtvis täcks av modultillverkarens effektgaranti så är det bättre att förekomma den. Det finns en del åtgärder i tillverkningen och celledesign som minskar känsligheten för LeTID. Det kan vara en bra idé att höra sig för med tillverkaren eller leverantören om modulerna har testats på LeTID och hur tillverkaren tar sig an frågan.²³

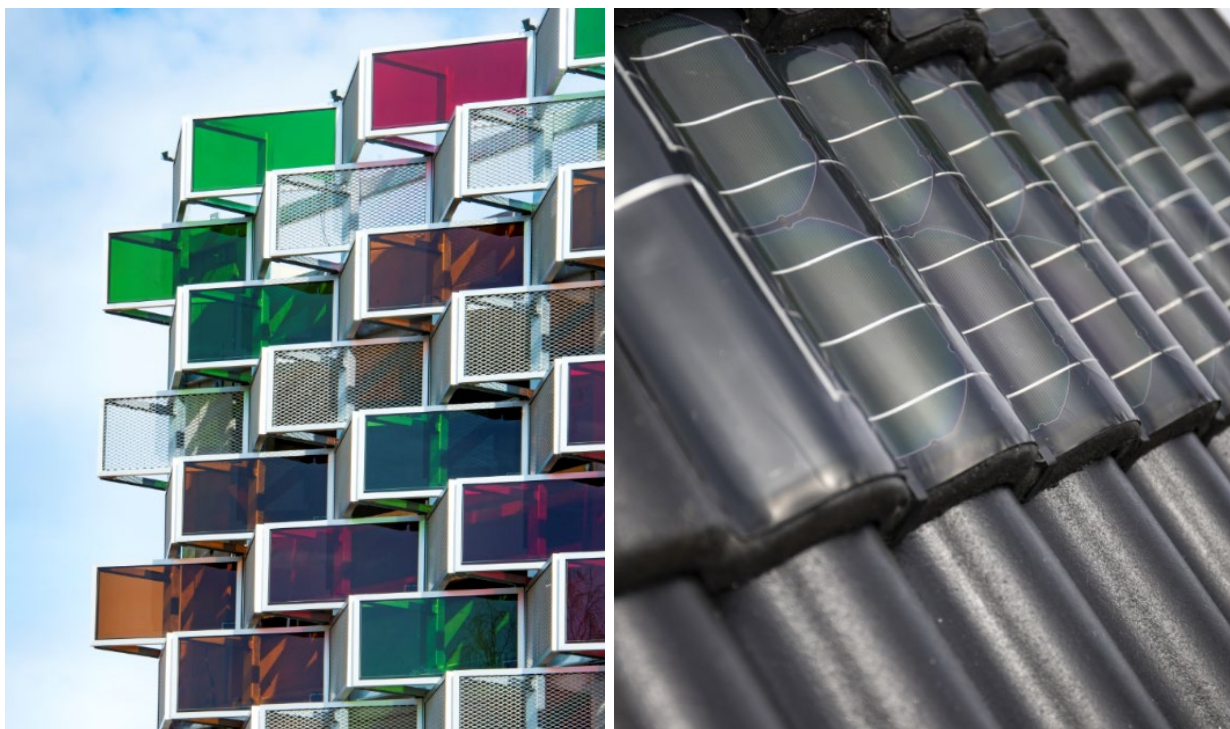
2.3.2 Tunnfilmssolceller – andra generationens solceller

Efter kiselsolcellen är tunnfilmssolcellen den vanligaste solcellen, som idag dock står för endast några få procent av världsmarknaden. Materialet i tunnfilmssolceller är effektivare på att fånga upp solljus än kiselsolceller och därför behövs det bara ett tunt skikt av själva solcellsmaterialet. Solcellsfilmen skapas på ett substrat av vanligtvis glas eller metall.

²² Källor: <https://news.energysage.com/perc-solar-cells-overview/> och <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/07/what-is-perc-why-should-you-care/>

²³ <https://www.pv-tech.org/guest-blog/is-letid-degradation-in-perc-cells-another-degradation-crisis-even-worse-th>

Det finns två relativt vanliga tunnfilmstekniker och en äldre teknik som presenteras nedan. De två främsta närmar sig verkningsgrader i klass med kiselceller.



Figur 8 Tunnfilmssolceller, från vänster till höger: semitransparenta CdTe-celler med färgskikt; flexibla CIGS-celler på takpannor ²⁴

Tunnfilmssolceller används idag främst där utseendet på solcellerna spelar en större roll, då de av många anses vara snyggare än kiselceller. Ett vanligt förekommande argument för tunnfilmssolceller är att de är bättre än kiselceller på att tillgodogöra sig diffust ljus, något som det inte finns något entydigt vetenskapligt belägg för.

2.3.2.1 CIGS- och CIS-celler

Dessa tunnfilmceller är gjorda med ett halvledarmaterial som består av koppar, indium och selen samt hos de flesta tillverkare även gallium. Typiska verkningsgrader för CIGS-moduler ligger idag runt 14-16%. Jämfört med kristallina kiselceller har CIGS-celler likvärdig till något lägre temperaturkänslighet.

På den svenska marknaden erbjuds CIGS-moduler från bl.a. Avancis, STION och Solar Frontier.

2.3.2.2 CdTe-celler

Den tunnfilmsteknik som hittills har uppnått högst verkningsgrad är CdTe, med ett aktivt skikt av kadmium och tellur. Typiska verkningsgrader för CdTe-moduler ligger på ungefär samma nivå som för CIGS (14-16%) men kommersiella moduler med dryga 18% verkningsgrad finns tillgängliga på världsmarknaden. Temperaturkänsligheten för CdTe-celler är lägre än för kiselceller och vanligtvis även lägre än för CIGS-celler.

²⁴ Bilder: SolTech Energy, Midsummer, Avancis

I Sverige används CdTe-celler nästan enbart i byggnadsintegrerade solcellsprodukter (se avsnitt 2.2.6) och verkningsgraden är då vanligtvis lägre än vad som angivits i förra stycket. 11 – 13% är vanliga värden för icke-transparenta byggnadsintegrerade solceller. För semi-transparenta CdTe-celler minskar verkningsgraden linjärt med transparensen (t.ex. 50% transparens ger ca 6% verkningsgrad).

2.3.2.3 Amorfa kiselceller

Amorfa kiselceller, även betecknad a-Si, är den tunnfilmstekniken som funnits längst på marknaden. Dess största fördel har varit den låga temperaturkänsligheten, betydligt lägre än kristallina kiselceller och CIGS-celler. Utvecklingen av effektiviteten för amorfa kiselceller har dock inte hängt med i jämförelse med de andra tunnfilmstekniker, och stannat av runt 7%.

Amorfa kiselceller är inte tillgängliga som standardprodukter på den svenska marknaden idag. Tekniken kan möjligen vara intressant i tillämpningar där kostnad per kvadratmeter är viktigare än anläggningens topp effekt, exempelvis på stora fasadytor. Den låga verkningsgraden på amorft kisel i kombination med prissättning per Watt-peak (Wp) gör att priser per kvadratmeter material troligen är lägre än för andra solcellstekniker.

2.3.3 Tredje generationen solceller

Rubriken tredje generationen solceller täcker in fler olika solcellstekniker än första och även andra generationen. I tredje generationen återfinns till exempel kvantprick-solceller, men även organiska solceller (också kallade plastsolceller ibland), grätzellceller (även kallad DSC eller Dye Sensitized Cells) och perovskitsolceller. Samtliga nämnda tekniker har potential att tillverkas billigare än första och andra generationens celler. De tre sistnämnda teknikerna kan tillverkas eller appliceras med enklare industriella processer som ”roll-to-roll” eller screentryck, vilket bör öppna upp för nya tillämpningar för solceller.

Teknikerna ovan nämns ofta som intressanta för byggnadsintegrering, dels på grund av tillverkningsprocesserna, men även då de kan göras med olika färg på solcellsskiktet. Det går till och med att göra solceller som är transparenta för synligt ljus, visserligen mot priset av en lägre verkningsgrad. Fönster med sådana solceller integrerade kan se ut som vanliga fönster samtidigt som de producerar solel. Ska tredje generationens solceller bli intressanta för tillämpningar på och i byggnader, behöver livslängden öka jämfört med dagens. Att få till stabila celler är den största utmaningen för dessa tekniker. Därför saknas kommersiella produkter för byggbranschen, men det finns produkter för andra tillämpningar som har lägre krav på livslängder, som exempelvis strömförsörjning till elektronikprodukter.

Av de olika tekniker bland tredje generationen solceller är perovskitsolceller den som det just nu troligen satsas mest på i forskning och utveckling. Huvudanledning är att teknikens verkningsgrad har gjort mycket stora framsteg på relativt kort tid. De senaste tio åren har verkningsgraden i labbmiljö (små celler) ökat dramatiskt från 3,9% 2009 till 25,2% år 2019. Det är mycket högre än någon av de övriga tredje generationstekniker, som 2019 har uppnått verkningsgrader mellan 12% och 17% i labbskala.

2.3.4 Tandemceller och multi-junctionceller

Ett sätt att öka verkningsgraden på en solcell är att kombinera den med en annan teknik, lager på lager. För att bli effektivt behöver de olika solcellstekniker som kombineras ha olika färgkänslighet, till exempel att den ena tekniken är bäst på att omvandla grönt ljus till el medan den andra har bäst prestanda för rött ljus. Kombinerar två olika tekniker så kallas det ofta för en tandemcell, medan en kombination av fler än två tekniker kallas för en multi-junction cell.

Många olika halvledarmaterial med olika ljuskänslighet kan kombineras i en cell i syfte att nå högre verkningsgrader. En teoretisk gräns för enkla solcellers verkningsgrad är cirka 33%, men med tandemceller kan man teoretiskt nå betydligt högre effektivitet, maximalt nära 50% med två material kombinerade (tandemcell).

På senare år har många forskargrupper, till exempel vid Ångströmlaboratoriet i Uppsala, arbetat med att kombinera perovskit (se även avsnitt 2.3.3) med tunnfilms- eller kiselsolceller. Ännu återstår troligen flera år av forskning innan dessa produkter har kommersialiserats och kan köpas till konkurrenskraftiga priser. De teoretiska gränserna på verkningsgraden ligger också ganska långt bort, men närmar sig sakta men säkert. 2018 registrerades en rekordverkningsgrad på 28% i labbmiljö på en tandemcell med perovskit och kisel²⁵.

Precis som för de flesta tandemceller befinner sig även utvecklingen av multi-junctionceller mest i forskningsstadiet. De första tillämpningar för sådana celler är i rymdteknik, där höga verkningsgrader och låg vikt är av mycket större relevans än priset per kWp.

2.4 Tillämpningar

Solcellsmoduler kan användas till olika tillämpningar både på mark och på byggnader. Den vanligaste tillämpningen på byggnader är utanpå befintliga tak, men som tidigare nämnts kan moduler även integreras i takkonstruktionen. På liknande sätt kan solcellsmoduler appliceras utanpå befintliga fasader eller integreras i fasadsystem. Utanpå fasader kan även solavskärmning med integrerade solcellsmoduler vara en passande tillämpning.

Beroende på tillämpningen kan olika modultyper vara mer eller mindre fördelaktiga. Det har tidigare nämnts att glas-glasmoduler är att föredra för fasadsystem, eftersom deras egenskaper motsvarar säkerhetsglas. Av samma anledning står dessa moduler sig bra som solavskärmning, balkongräcken eller (skärm)tak.

När moduler integreras i bebyggelsen så minskar vanligtvis ventilationsmöjligheterna och modulerna blir varmare under drift. Då kan det finnas fördelar med att använda moduler med lägre temperaturkänslighet, vilket ofta är fallet för tunnfilmsmoduler.

I kapitel 5 finns mer information om teknikval och val av storlek på en solcellsanläggning.

3 Växelriktare

3.1 Allmänt om växelriktare

Det finns enkelt uttryckt fyra huvudtyper av växelriktare för soleanläggningar till den svenska villamarknaden. Strängväxelriktare med sträng- eller moduloptimerare, mikroväxelriktare samt hybridväxelriktare. Avsnitt 3.2-3.4 avhandlar dessa olika typer men inledningsvis beskrivs här vissa generella egenskaper och karakteristika hos dessa produkter.

3.1.1 Ursprung, pris och kvalitet

Liksom för solcellsmoduler så finns det ett antal olika varianter av växelriktare och tillverkning sker både i Europa, där de första stora tillverkarna etablerade sig, samt i USA och i Asien. Framförallt de kinesiska tillverkarnas etablering har, liksom för solcellsmoduler, inneburit en mycket hård konkurrens för de europeiska företagen med erbjudanden som väl matchar de senares. För konsumenterna har konkurrensen inneburit sjunkande priser, dock inte lika kraftigt som för moduler. De flesta fabrikaten ligger på ungefär samma prisnivå inom +/- 10 procent, men det finns de som ligger väsentligt högre i pris. Om dessa skillnader beror på skillnader i kvalitet eller, kanske mer troligt, på skillnader i de funktioner som olika produkter erbjuder har inte kunnat utrönas. Priset per kW effekt sjunker snabbt med ökande storlek på växelriktaren. För en 10 kW växelriktare är priset per kW till exempel 40 till 50 procent av priset per kW för en 3 kW växelriktare.

²⁵ <https://www.oxfordpv.com/news/oxford-pv-perovskite-solar-cell-achieves-28-efficiency>

3.1.2 Kapacitet och effektivitet

Växelriktare finns hos de flesta leverantörer i storleksintervall om cirka 2 till 5 kW med trefasväxelriktare från cirka 3 kW och uppåt. Trefas är standardalternativet eftersom anläggningen då kan förse samtliga husets förbrukare, till skillnad från en enfasanläggning som i normalfallet endast kan förse de förbrukare som är anslutna till samma fas som inmatningen sker på. Nätägarna ser dessutom ogärna enfasanläggningar, även om enstaka anläggningar inte påverkar nätet. Skälet är att man hyser en viss oro för att det ska ge upphov till snedbelastningar i nätet. Växelriktare underdimensioneras ofta med 10 till 20 procent i förhållande till solcellsmodulernas maximala uteffekt eftersom det gör att de används mer effektivt. De flesta anläggningar har nämligen inte helt optimala förutsättningar med avseende på placering och driftförhållanden, se Tabell 3, vilket gör att de sällan eller aldrig kommer upp i den märkeffekt som anges på modulerna. Vid de enstaka tillfällena gör det så begränsas uteffekten automatiskt av växelriktaren och den energiproduktion man därvid tappar kompenseras av effektivare drift under normala driftförhållanden. Man kan dessutom ibland spara material och en del pengar genom att välja en mindre, något underdimensionerad växelriktare.

Eftersom effektiviteten varierar över växelriktarens arbetsområde, dvs beroende på hur stor andel av maxeffekten som belastar den, så har man kommit överens om att ange en sammanvägd så kallad EU-verkningsgrad. Ska man jämföra olika växelriktares effektivitet så är det alltså detta värde man ska jämföra, inte maximal verkningsgrad eller liknande. Effektiviteten på dagens växelriktare ligger oftast mellan 95 och 98 procent.

3.1.3 Växelriktarens placering

Trots den höga verkningsgraden så blir mellan 2 och 5 procent av effekten från solcellerna till värme i växelriktaren vilket för en 10 kW anläggning motsvarar mellan 200 och 500 W. Man bör alltså tänka på att sörja för god ventilation i utrymmet där växelriktaren placeras, särskilt om utrymmet i sig blir varmt på sommaren, till exempel på en vind. Vissa växelriktare har en inbyggd fläkt för att kylningen ska bli tillräckligt effektiv medan andra klarar sig utan fläkt. Placeras växelriktaren nära vistelseutrymmen i huset bör man tänka på att fläktljudet och ibland även andra ljud från den kan vara störande. De flesta växelriktare är klassade för att klara montering utomhus (IP 65). Säkerhetsmässigt är utomhusplacering att föredra eftersom alla likspänningskablar då hamnar på byggnadens utsida, men man bör tänka på att välja en skuggad plats och gärna ha ett skärmtak som skyddar mot regn och snö.

3.1.4 Växelriktarens två huvuduppgifter

Kraftelektroniken i ett solcellssystem, d.v.s. växelriktaren eller en kombination av så kallade optimerare och växelriktare har två huvudsakliga uppgifter att utföra:

- de ska överföra solcellsmodulernas likström till växelström så effektivt som möjligt och
- de ska vid varje tidpunkt belasta solcellsmodulerna optimalt så att mesta möjliga mängd energi tas ut oavsett solintensitet och andra förhållanden som påverkar modulernas förmåga att generera el

Denna driftoptimeringsfunktion kallas ”maximalpunktsföljare” eller ”Maximum Power Point Tracker” vilket ofta förkortas MPPT. Det traditionella och på marknaden helt dominerande sättet att lösa detta är att använda strängväxelriktare där båda dessa funktioner är inbyggda i en och samma produkt. I ett mindre solcellssystem använder man normalt bara en växelriktare som är kopplad till en eller två strängar där varje sträng består av en rad seriekopplade solcellsmoduler. En sådan växelriktare kan innehålla en eller flera MPPT:s. Flera maximalpunktsföljare kan bidra till ett högre energiutbyte från systemet om t.ex. en väsentlig

del av systemet tidvis är skuggad medan en annan del är oskuggad eller om man har delar av anläggningen i olika väderstreck.

Alternativt kan optimeringsfunktionen vara utlokaliserad till moduloptimerare, alltså en kompletterande produkt där var optimerare hanterar en eller två solcellsmoduler. Dessa har blivit väldigt populära i Sverige, hos villaägare främst för att de erbjuder avancerade möjligheter till driftuppföljning av varje enskild modul. Lokala optimerare kompletteras med en central enhet som gör om likström till växelström på samma sätt som för den klassiska strängväxelriktaren. I större anläggningar är det främsta skälet till att välja moduloptimerare att de anses göra anläggningen säkrare genom att man kan göra kablaget mellan moduler och växelriktare strömlöst vid behov, vilket en strängväxelriktare normalt inte klarar. Expertisen på området är ännu inte överens om vad som är den bästa lösningen med avseende på likströmskablage och elsäkerhet. Moduloptimerarna möjliggör ”avstängning vid var modul” men innebär samtidigt att många fler komponenter och kopplingspunkter introduceras i systemet vilket i sig ökar sannolikheten för fel.

Ungefär samma funktionalitet som i en moduloptimerare kan man hitta i en mikroväxelriktare som dessutom sköter omriktningen från likström till växelström lokalt vid modulerna som då i princip kan betraktas som växelströmsmoduler.

3.1.5 Driftövervakning och kommunikation

I tillägg till optimeringen finns ytterligare ett antal viktiga funktioner som växelriktarna i varierande omfattning hanterar som standard eller som tillval:

- Mätning och datalagring av anläggningens strömmar, spänningar, effekter och energier som via olika gränssnitt presenteras för anläggningsägaren i mobil eller liknande kompletterat med avläsning direkt på växelriktarens display.
- Driftövervakning och skyddsfunktioner som t.ex. isolationsmätning, jordfelsbrytare, överströmsskydd, överspänningsskydd och effektbegränsning
- Kommunikation med omvärlden sker normalt via wifi eller LAN-kabel, för datalagring ”i molnet” och för att kommunicera information om eventuella fel i anläggningen

Det är svårt att vägleda om vad som bör ingå, men uppkoppling mot en server och funktioner som ger återkoppling, t.ex. via ett sms om något inte står rätt till i anläggningen bör ingå som standard. Isolationsmätning skall, enligt de svenska elinstallationsreglerna ingå. Den senare upptäcker om isoleringen någonstans i anläggningen har försämrats vilket innebär att risken för kortslutning ökar. Problem med kommunikationen från växelriktaren till omvärlden via wifi eller LAN är tyvärr inte ovanligt varför det kan vara en god idé att ägna detta lite extra uppmärksamhet. Överspänningsskydd kan vara en bra funktion om man vet med sig att man bor i ett område som ofta är utsatt för åska.

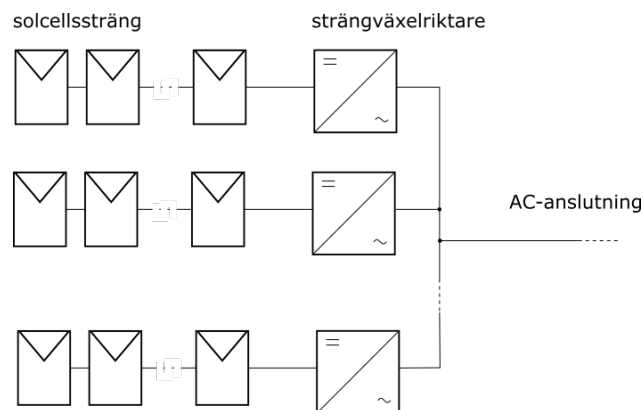
Så kallat Ö-driftsskydd ingår i alla nätanslutna växelriktare vilket är ett krav, liksom ett reläskydd som kopplar bort växelriktaren om spänning eller frekvens går utanför vissa förinställda gränser. Det förra innebär att utrustningen inte kan mata ut någon växelström om det allmänna elnätet blir strömlöst. I en hybridväxelriktare, se 3.4, som ska fungera som reservkraftsanläggning måste ö-driftsskyddet kunna kopplas ur eftersom reservkraftsdrift innebär att anläggningen fungerar som en ö eller ett eget litet kraftnät. Samtidigt måste soleanläggningen och byggnaden fysiskt kopplas bort från det allmänna elnätet när anläggningen går i ö-drift. Bortkopplingen av ö-driftsskyddet och frånskiljningen från det allmänna elnätet sker som regel automatiskt i en reservkraftanläggning. En förekommande missuppfattning är att man blir självförsörjande på el vid ett strömavbrott om man installerar en soleanläggning, men för att bli det måste man alltså investera i en utrustning avsedd för just detta, se 3.4.

3.1.6 Garantier

Växelriktare levereras ofta med 5 års garanti, men det finns produkter med avsevärt längre garantitid. Vissa leverantörer erbjuder en tilläggsförsäkring för ytterligare exempelvis 5 år, men erfarenheten har visat att om växelriktare går sönder i förtid så sker det nästan alltid under de första ett eller två åren. Undantaget är fel på grund av åsknedslag som kan inträffa närsomhelst och som ändå normalt inte omfattas av garantin. Annars anger man vanligtvis växelriktarens livslängd till 15 år, d v s man räknar med att den byts ut en gång under anläggningens (=solcellsmodulernas) beräknade livslängd.

3.2 Strängväxelriktare

Strängväxelriktare är som nämnts ovan den helt dominerande lösningen på världsmarknaden och det finns cirka 15 olika fabrikat tillgängliga i Sverige. Sedan länge etablerade europeiska fabrikat är SMA, Fronius, och Steca. Produkter som funnits med ett antal år är t.ex. kinesiska Sungrow, italiensktillverkade ABB och tyska Kostal. Fabrikat som t.ex. Goodwe, Growatt och Zeversolar är relativt nya i Sverige. De vanligaste storlekarna i villasystem är på mellan 5 och 12 kW. En enhet kan väga mellan 20 och 50 kg och mäter cirka 0,6 x 0,5 x 0,3 meter. En strängväxelriktare som arbetar utan lokala moduloptimerare har i stället en eller flera inbyggda strängoptimerare. Två strängoptimerare är till exempel användbart för att bibehålla ett högt utbyte i en anläggning där nedre halvan tidvis skuggas eller i en anläggning med moduler placerade i olika riktningar.



Figur 9 Förenklad schema för solcellsanläggning med strängväxelriktare ²⁶

3.3 Moduloptimerare och mikroväxelriktare

Som nämnts i avsnitt 3.1.4 så kan optimeringsfunktionen, som i de flesta fall integreras i växelriktaren, också utlokaliseras till modulerna. På så sätt skapas förutsättningar för att hantera svårare skuggningsproblematik men det finns även andra intressanta egenskaper hos dessa produkter. Elsäkerhet framhålls ofta som ytterligare ett skäl till att använda någon form av decentraliserad styrning eftersom det gör det möjligt att stänga av modulerna direkt vid deras anslutningar vid en brand eller fel i anläggningen. Med moduloptimerare är det också enklare att följa energiproduktionen och diagnosticera eventuella fel i enskilda moduler i systemet. Samtidigt innebär det att det blir fler väderutsatta elektronikkomponenter och kopplingspunkter i systemet vilket kan vara en svaghet med tanke på att ett solelsystem förväntas ha en livslängd på flera tiotals år.

²⁶ Bild: RISE (M. van Noord)

Mikroväxelriktare har liknande funktionalitet som moduloptimerare men har dessutom omvandlingen från likström till växelström utlokaliserad till modulerna och kablarna från modulerna transporterar alltså växelström. En mikroväxelriktare kan liksom optimerare kopplas till en, två eller ibland fyra solcellsmoduler. En för Sverige ny produkt kopplas till fyra moduler och kan då leverera trefas växelström.

De vanligaste lösningarna för moduloptimerare innebär ”allt eller inget-lösningar” vilket betyder att man är bunden till ett fabrikat och att samtliga moduler i anläggningen utrustas med samma optimerartyp. Solar Edge optimerare kan till exempel inte monteras enbart på skuggade moduler utan måste monteras på samtliga moduler och kan bara kombineras med Solar Edge växelriktare. En variant på detta är en moduloptimerare, till exempel Tigo, som kan kombineras med ett stort antal olika fabrikat på strängväxelriktare. Den behöver inte heller monteras på samtliga moduler i anläggningen utan bara på de som under sommarhalvåret ofta är skuggade.. Övriga moduler kopplas direkt till växelriktaren.

Mikroväxelriktare eller optimerare ger generellt sett en högre investeringskostnad och kan därför vara svåra att motivera om man inte har särskilt svåra skuggningsförhållanden eller är väldigt intresserad av att följa anläggningens funktion och energiproduktion. Deras marknadsandelar globalt är mindre än 5%, men moduloptimerare i kombination med strängväxelriktare har blivit relativt vanliga i Sverige. De dominerande fabriken är Solar Edge (som är en ”allt eller inget-lösning, se ovan) och Tigo (som erbjuder en mer flexibel lösning, se ovan), men även Huawei erbjuder nu en lösning liknande Tigos. Mikroväxelriktare är inte särskilt vanliga och endast ett fåtal fabrikat marknadsförs i Sverige.

3.4 Hybridväxelriktare

Hybridväxelriktare är en växelriktare som förutom de sedvanliga funktionerna beskrivna ovan även kan ladda upp och ladda ur ett batteri. Dessutom kan den i vissa utföranden göra att systemet kan fungera som ett reservkraftsystem, det vill säga en elförsörjning som är oberoende av det allmänna elnätet under kortare tider.

För att det ska vara meningsfullt att investera i en hybridväxelriktare måste anläggningen innehålla ett batteri för lagring av el. Då finns det förutsättningar för att anläggningen ska fungera som ett reservkraftsystem och försörja ett antal elförbrukare under en kortare tid, typiskt några timmar. Solcellerna är ingen nödvändig komponent i ett sådant system, men genom att kombinera sin solelanläggning med ett batteri och en hybridväxelriktare utrustad för ändamålet kan man åstadkomma en reservkraftanläggning med betydligt större uthållighet. Detta eftersom solcellerna successivt kommer att ladda upp batteriet efter att det laddas ur. En solcellsanläggning med konventionell växelriktare är däremot inte till någon hjälp om det allmänna elnätet slutar fungera eftersom den av säkerhetsskäl stänger av sig om det blir avbrott på det allmänna nätet.

Med ett batterilager kan en fastighetsägare dels öka sin egenanvändning av producerad solel genom att lagra sitt överskott under dagtid för att sedan använda det när solcellerna inte producerar tillräckligt för att täcka behovet. En annan nytta med batteriet är att det, om det har tillräcklig kapacitet, gör att man kan minska storleken på sin huvudsäkring. Det ekonomiska värdet av dessa nyttor beror av en rad olika faktorer vilka vi inte går djupare in på här, men sannolikt är att både ökad egenanvändning av producerad solel och begränsning av effektuttag kommer att bli alltmer lönsamt de närmaste åren. I Sverige finns det ett investeringsstöd på max 60 procent eller 50 000 kronor för den som senast sista december 2019 installerar ett batterilager i anslutning till ett solelssystem.

3.4.1 Hybridväxelriktarens funktioner

Tekniken med hybridväxelriktare för villatillämpningar är ung och utvecklas för närvarande starkt, varför det kan vara klokt att vänta något år med en sådan investering. Det är näst intill omöjligt för en lekman att utifrån tillverkarnas datablad avgöra vad produkterna kan eller inte kan göra, vilka funktioner som ingår som standard och vilka som är tillval och så vidare. Vissa produkter låser upp kunden till dyra litiumjonbatterier genom att de arbetar med höga spänningar, men det finns som nämnts ovan andra lösningar att tillgå. Ytterligare ett skäl till att vänta kan vara om man går i funderingar kring att skaffa en elbil. En teknik som kallas V2G (Vehicle to Grid, eller Fordon till Elnät) innebär att elbilens batterier ska kunna kopplas upp mot huset och det allmänna elnätet varigenom förespråkarna tror sig kunna uppnå flera nyttor för både individen/ husägaren och samhället/ kraftnätet. Tekniken har diskuterats i mer än tio år och ser inte ut att vara nära något stort genombrott men samtidigt så finns det två elbilmärken som i princip är klara för V2G.

Hybridväxelriktarens funktioner i korthet, notera dock vad som nämnts ovan om variationer i utbud och tillval, m.m.:

- Den ska kunna ladda upp och ladda ur ett batteri (se ovan om inspänningsnivå som styr möjliga batterityper)
- Den ska kunna ladda från nätet, från soleanläggningen och eventuellt från ytterligare en kraftkälla (Flera så kallade hybridväxelriktare har inte funktionerna för att hantera solcellerna inbyggda utan är ett tillägg till en traditionell strängväxelriktare)
- Den ska kunna gå över i Ö-drift vid strömbrott i det allmänna elnätet. Detta kan beroende på produkt ske på millisekunder, vilket användaren då knappt märker av, eller ta flera sekunder. Om produkten inte är klassad som en så kallad UPS (Uninterruptible Power Supply eller avbrottsfri kraft) kan ytterligare komponenter krävas för att den ska vara godkänd för inkoppling. Notera också att system som kan gå in i ö-drift/reservkraftsdrift enligt svenska regler ska vara försedda med en lokal jordpunkt/ ett extra jordtag.
- Den ska ha en prioriterad kraftutgång som ser till att vissa anslutna förbrukare alltid får den effekt de behöver (Många hybridväxelriktare har ganska låg effekt i Ö-driftsläge och batteriets lagringskapacitet är också relativt låg så varken effekt eller energi räcker särskilt långt om samtliga anslutna förbrukare ska matas som vanligt).

4 Takinstallation, infästningsanordningar och taktyper

Solcellsmoduler i det absolut vanligaste formatet 1,6 x 1 meter kan i princip monteras på vilket takmaterial och vilken taktyp som helst, liksom på fasad eller på en ställning på marken. En så kallad takguide²⁷ har tagits fram inom den regionala solesatsningen Sol i Väst. I denna finns utförliga beskrivningar av olika sätt att montera på platta eller lutande tak, på tegel, papp, falsade eller korrugerade plåttak. Viktigt att beakta vid val av monteringsystem är att leverantören tar hänsyn till de lokala vind- och snölasten som kan förekomma (finns en vindlastberäkning till grund för dimensioneringen? Om taket är platt eller låglutande: Kan det finnas anledning att kontrollera takets bärförmåga?) och att takets väderskydd förblir intakt efter montaget. Att kablar från modulerna till växelriktaren fästs upp ordentligt och inte blir liggande på taket under

²⁷ Takguide för infästning av solceller - Sol i Väst. Version 1, oktober 2014. Paradisenergi.
<https://www.solivast.nu/wp-content/uploads/2018/12/Studiematerial-3-Installation-och-slutbesiktning-v2.pdf>

modulerna är mycket viktigt. De ska klamras fast i moduler och stativ och vid längre sträckningar förläggas i skenor eller rör. Kabelgenomföringar i tak eller vägg bör utföras så att plus och minuskablar är separerade och så att de inte ligger an mot några skarpa kanter som på sikt kan nöta bort isoleringen. Samtidigt ska plus- och minuskablar dras nära varandra så att de inte bildar öppna slingor vilket kan ge upphov till radiostörningar och öka risken för skador på elektroniken i växelriktare och eventuella optimerare i händelse av åsknedslag.

5 Systemaspekter

Tidigare kapitel har behandlat enskilda produkttyper och produktgrupper och deras specifika egenskaper. I detta kapitel diskuteras vad som styr mot valet av en viss produkttyp – det kan bero på anläggningens ändamål, men även på andra, förutsättningar såsom ekonomi eller regelverk.

5.1 Stöd vid val av solcellsmodulstyp

Vilken typ, eller vilka typer av solcellsmoduler som är relevanta beror framförallt på följande aspekter:

- 1) Placering av solcellsmodulerna
 - a) Tak – utanpåliggande
Inga särskilda rekommendationer för montering där modulerna följer takets lutning, vilket i normalfallet innebär att bygglov inte krävs, däremot som regel en bygganmälan. Undantag kan dock förekomma i vissa kommuner, till exempel om installationen innebär att man byter takfärg. Upplutade moduler på ljus (plan) takyta är gynnsamt för bifacialmoduler. På lutande tak avråder man från upplutat montage av estetiska skäl.
 - b) Tak – integrerad
Moduler för byggnadsintegrering (se avsnitt 2.2.6), beakta eventuellt moduler med lägre temperaturkänslighet, det vill säga tunnfilmsmoduler, halvcellsmoduler eller heterojunction- (=HIT) moduler.
 - c) Tak och fasad – glassystem
Glas-glasmoduler för deras egenskaper motsvarande säkerhetsglas, det vill säga lastbärande även om glaset är krossat.
Semi-transparenta tak/-fasader till arbets- och bostadsrum bör ha en jämn grad av transparens över hela solcellsmodulen. Glas-glasmoduler med kiselceller ger för stor ljuskontrast.
 - d) Fasad – utanpåliggande
Fördelaktigt med glas-glasmoduler som motsvarar säkerhetsglas, särskild på höga fasader. Även brandsäkerheten gynnas av glas-glasmodulers uppbyggnad.
 - e) Fasad – integrerad
Moduler med lägre temperaturkänslighet, det vill säga tunnfilmsmoduler, halvcellsmoduler eller heterojunction-moduler är att föredra. Liksom glas-glasmoduler (se Fasad – utanpåliggande)
 - f) Solavskärmning
Icke-transparent solavskärmning bör ha vit/ ljus baksida för att få bättre ljusmiljö inomhus. Svart baksida ger för stora ljuskontraster. Semi-transparent solavskärmning till arbets- och bostadsrum bör ha en jämn grad av transparens över hela solcellsmodulen. Glas-glasmoduler med kiselceller ger för stora ljuskontraster mellan de mörka cellerna och de transparenta mellanrummen mellan cellerna. För stora kontraster kan lätt upplevas som bländande.
 - g) Balkongräcken e.d.
Glas-glasmoduler för deras egenskaper motsvarande säkerhetsglas, det vill säga

lastbärande även om glaset är krossat.

- 2) Solcellsmodulernas synlighet
 - a) Hög synlighet och/eller höga estetiska krav
Solcellsmoduler som passar byggnadens arkitektur, vilket oftast gynnar moduler för byggnadsintegrering och även tunnfilmsmoduler. I viss mån kan helsvarta kiselmoduler (svart baksida och svart ram samt mörka enfärgade kiselceller) vara ett alternativ. Dessa råd gäller inte minst i kulturminnesmärkta områden och vid hög synlighet från gator eller park.
 - b) Medelhög synlighet och/eller medelhöga estetiska krav
Moduler för byggnadsintegrering, främst massproducerade storlekar (avsnitt 2.2.6.1) i kombination med tunnfilmsmoduler eller helsvarta kiselmoduler.
 - c) Låg synlighet
Inga särskilda rekommendationer.
- 3) Tillgänglig yta i relation till elbehov
 - a) Stor yta i relation till elbehov (mer än 7 kvm eller mer per önskad kWh solelproduktion)
Inga tekniska rekommendationer. Ekonomiskt kan det vara fördelaktigt med vanliga massproducerade kiselmoduler om ytan får täckas delvis, på grund av lägre kostnad per kWp. Ska hela ytan täckas med solceller är det ekonomiskt fördelaktigt med lågeffektiva moduler (vissa tunnfilmsmoduler eller vanliga kiselmoduler) på grund av lägre kostnad per kvadratmeter.
 - b) Medelstor yta i relation till elbehov (6-7 kvm per önskad kWh solelproduktion)
Inga särskilda rekommendationer.
 - c) Liten yta i relation till elbehov (mindre än 6 kvm per önskad kWh solelproduktion)
Högeffektiva moduler, som t.ex. n-typ mono-celler¹⁸, HIT-celler¹⁶, PERC-celler¹⁷.
- 4) Budget
 - a) Investeringskostnad
Reguljära kiselmoduler är billigast, se Tabell 2, och ger i de flesta fall även lägst totalkostnad för hela anläggningen. Undantag kan finnas där något effektivare moduler trots högre pris ger ett billigare system på grund av lägre kostnader för installationsarbetet och montagesystem. Takintegrerade system eller helsvarta utanpåliggande moduler blir som regel dyrare per kW installerad effekt, i vissa fall väsentligt mycket dyrare.
 - b) Livscykelkostnad för producerad el
Det är svårt att ge allmänna råd om vilka modultyper som ger billigast solel under sin hela livslängd, eftersom det finns många aspekter som spelar in. Hur stor är investeringen? Hur länge håller modulerna och hur mycket degraderar de? Vilken kalkylränta (avkastning och/eller ränta på lån) gäller? Hur stor del av den producerade elen ligger till grund för elcertifikat? Det är bara några exempel på viktiga frågor. För att få en uppfattning av hur olika aspekter påverkar hänvisas till solelkalkylen på Solelportalen²⁸, där det även finns en länk till en investeringskalkyl från Mälardalens Högskola där ännu fler parametrar kan justeras.

²⁸ <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/vad-kostar-det/solelkalkyl/>

5.2 Skuggningens relevans för komponentval och optimering av teknisk lösning

En viktig aspekt som kan påverka val av både solcellsmoduler och växelriktarlösning är hur pass utsatt systemet är för skuggning. Grundregeln är naturligtvis att så långt det är möjligt undvika skuggning av solcellsmodulerna.

Hur stor påverkan som skuggning har på en solcellsmodul beror på hur cellerna är fördelade över modulen och på antalet samt kopplingen av bypass-dioder (se även 2.1.2). I vissa fall kan tunnfilmsmoduler vara mindre skuggningskänsliga än de vanligaste kiselmodulerna, men det gäller endast så länge skuggningen inte påverkar en hel solcell i tunnfilmsmodulen. Halvcellsmoduler har alltid en lägre skuggningskänslighet än kiselmoduler med hela celler, förutsatt att båda har lika många bypass-dioder. Sedan finns det multi-diod moduler som minskar skuggningens påverkan i nivå med antalet bypass-dioder.

Hur väl ett solcellssystem minimerar skuggningsförluster beror inte bara på solcellernas placering och antal bypass-dioder. Viktigt är även hur solcellsmodulerna kopplas ihop i strängar och ansluts till MPPT (maximalpunktsföljare) i strängväxelriktaren. Fler MPPTer i växelriktaren innebär att man har bättre möjlighet att hantera solceller placerade i olika väderstreck eller om en ansevärd del av modulerna är skuggade under en del av dagen/ året. Decentraliserade effektoptimerare, som moduloptimerare eller modul-växelriktare, är verkningslösa vid vissa varianter av skarpa skuggor, exempelvis från kanter. Däremot kan de fylla en funktion vid splittrad skuggning, exempelvis från träd. Samtidigt innebär decentraliserade optimerare också mer elektronik, vilket innebär fler delar som kan ge upphov till fel, och i många fall också ökade kostnader.

Skuggningsoptimering är en komplicerad fråga och vi hänvisar till skuggningshandboken²⁹ som ger en fördjupning i ämnet. Bland annat jämförs olika systemlösningar för olika skuggningsförhållanden.

5.3 Stöd vid val av växelriktartyp

Även för växelriktare sammanfattas här ett antal viktiga aspekter som kan vara ett stöd vid val av en viss teknisk lösning. De viktigaste aspekterna är:

- 1) Antal olika riktningar (orienteringar och/eller lutningar) på solcellerna
Utöver skuggningshantering spelar även antalet olika riktningar på modulerna i en solcellsanläggning roll för hur många MPPTer (maximalpunktsföljare/ effektoptimerare) som bör finnas. Och det kan påverka växelriktartyp:
 - a) Fler än tre olika riktningar
I dessa fall räcker vanligtvis inte antalet MPPTer i en strängväxelriktare och då blir det i stället aktuellt med moduloptimerare, modul- eller mikroväxelriktare, alternativt flera mindre strängväxelriktare.
 - b) Två eller tre olika riktningar
Strängväxelriktare med två eller tre MPPTer, såvida inte skuggningshantering ställer andra krav. Tre MPPTer är mindre vanligt i små växelriktare men kan förekomma. För andra alternativ, se punkt a)
 - c) En riktning
Strängväxelriktare med en eller (om det inte kostar extra) möjligen flera MPPTer, såvida inte skuggningshantering ställer andra krav.

²⁹ Skuggningshandbok (Energiforskrappport 2017-385); Författare: Anna Bengtsson, Erik Holm, David Larsson, Björn Karlsson; <https://www.energiforsk.se/program/solel/rapporter/skuggningshandbok-2017-385/>

- 2) Anslutning av batterier
 - a) Inga batterier
Inga särskilda rekommendationer.
 - b) Batterier ska anslutas
Hybridväxelriktare är fördelaktigast då vissa av dem erbjuder en helhetslösning där alla nödvändiga funktioner (exkl. batterier) ingår i en enda produkt utvecklad för ändamålet, se dock 3.4 där teknikens mognadsgrad diskuteras.
- 3) Nätansluten drift och/eller off-grid drift
 - a) Endast nätansluten drift
Inga särskilda rekommendationer
 - b) Off-grid och nätansluten drift
Hybridväxelriktare, som (vissa av dem) erbjuder en helhetslösning som fungerar både vid off-grid och nätansluten drift, se dock 3.4.
- 4) Budget
 - a) Investeringskostnad
Strängväxelriktare är billigast och ger lägst investeringskostnad. De flesta fabrikaten ligger på ungefär samma prisnivå inom +/- 10 procent, men det finns de som ligger väsentligt högre i pris. Priset per kW effekt sjunker snabbt med ökande storlek på växelriktaren.
 - b) Livscykelkostnad för producerad el
Det är svårt att ge allmänna råd om vilka växelriktartyper som ger billigast solel under livslängden, eftersom det finns många aspekter som spelar in. Hur stor är investeringen? Hur stora är skuggningsförlusterna vid olika lösningar? Hur länge håller växelriktarna? Hur värderas driftuppföljning? Vilken kalkylränta (avkastning och/eller ränta på lån) gäller? Hur stor del av den producerade elen ligger till grund för elcertifikat? Det är bara några exempel på viktiga frågor. För att få en uppfattning av hur olika aspekter påverkar hänvisas till solelkalkylen på Solelportalen³⁰, där det även finns en länk till en investeringskalkyl från Mälardalens Högskola i där ännu fler parametrar kan justeras.

5.4 Om den optimala storleken för en solcellsanläggning

Det finns nästan lika många optimala storlekar på en solcellsanläggning som det finns köpare. Lokala förutsättningar på huset, omgivningen, elanvändning och personliga drivkrafter är alla relevanta faktorer när storleken ska bestämmas.

En stor del av de som investerar i solceller gör det bland annat av miljö- och klimatskäl. Ur den aspekten är det troligen optimalt att bygga en så stor anläggning som får plats med hänsyn till skuggning med mera. Om målet med investeringen är största möjliga avkastning så är det fullt möjligt att den optimala storleken är mindre än vad som skulle få plats på taket. På Solelportalen – Hur stor anläggning passar mig?³¹ finns mycket information om hur ekonomin och lönsamheten påverkas av storleken och andra förutsättningar.

³⁰ <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/vad-kostar-det/solelkalkyl/>

³¹ <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/hur-stor-anlaggning-passar-mig/>

5.5 Hur mycket skiljer sig energiproduktionen mellan olika tekniska lösningar?

Frågar man olika installatörer om hur mycket solel en solcellsanläggning på ett och samma tak kan producera kan det bli stora skillnader i svaren. Skillnaderna beror vanligtvis mer på hur olika installatörer har räknat än på riktiga skillnader mellan deras olika tekniska lösningar. Om lutningen och orienteringen på solcellsmodulerna är givna och skuggningen är begränsad till morgon/kväll och vinterhalvåret så är det osannolikt att utbytet för olika tekniska lösningar skiljer sig mer än enstaka procent. Med utbytet menas här antal kilowattimmar som produceras per år och installerad solcellseffekt (märkeffekt), eller kWh/kWp/år. Jämförs dessa siffror så justeras för eventuella skillnader i anläggningsstorleken (märkeffekt) som till exempel kan uppstå på grund av olika verkningsgrad på de offererade modulerna.

Istället för verkliga skillnader mellan system kan skillnaderna i produktionsberäkningarna beror på ett eller flera av följande faktorer:

- Olika antaganden om årlig solinstrålning
Det finns många olika källor till solinstrålningsdata för olika platser i Sverige och det är inte ovanligt att årsvärdena för en och samma plats skiljer sig +/-10%. Om olika installatörer räknar med data från olika källor kan det ge mycket olika produktionsprognoser, även om man i övrigt gör samma antaganden. Ett tips är att be alla man frågar att använda samma data, t.ex. månadsdata från PVGIS-SARAH eller PVGIS-ERA5 som finns tillgängliga i PVGIS-verktyget³².
- Olika sätt att beräkna skuggningsförluster
En del installatörer räknar inte med några skuggningsförluster alls i de kalkyler som bifogas offerterna, medan andra tar hänsyn till skuggning, men kanske räknar på olika sätt. Skuggningsberäkningar kan ta hänsyn till bara minskad instrålning eller även ta in effekterna av bypass-dioder och sträng- eller moduloptimering. Om det inte framgår från offerten eller kalkylen om och hur skuggning har tagits in i beräkningen ska man fråga leverantören hur de har räknat.

5.6 Priset för ett villasystem

Energimyndigheten rapporterar varje år till IEA (International Energy Agency) en undersökning av hur den svenska solelmarknaden utvecklas. I rapporten³³ ges en bred överblick av såväl den kommersiella marknaden som av forskning och utveckling inom området och av hur många som arbetar inom de olika grenarna. Rapporten redovisar också en sammanställning av hur priset på solcellssystem i olika marknadssegment utvecklas år för år. För 2018 redovisades ett genomsnittligt pris på ett nyckelfärdigt³⁴ solcellssystem i intervallet 5-10 kW topp effekt på cirka 18 100 kr/kW inklusive moms och före eventuella bidrag. För system i intervallet 10-20 kW topp effekt låg priset på cirka 15 600 kr/kW inklusive moms och innan eventuella bidrag. En viss spridning förekommer naturligtvis och i rapporten anges intervallet 15 000-22 500 kr/kW som en "normal" spridning. I enskilda fall, exempelvis för högeffektiva och snyggt integrerade anläggningar kan priset vara väsentligt mycket högre.

Det finns flera oberoende forum på internet där man som privatperson kan lägga ut en offertförfrågan³⁵. Det kan dock vara svårt att jämföra ett antal olika offerter man får in på detta

³² PVGIS är ett online verktyg framtagen av det Europeiska forskningsinstitutet ISPRA. PVGIS finns på: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

³³ National Survey Report of PV Power Applications in Sweden 2018. Energimyndigheten och IEA PVPS

³⁴ Med nyckelfärdigt menas hela systemet, installerat och klart för driftsättning

³⁵ Se t.ex. <https://www.svensksolenergi.se/att-installera-solenergi/intresseanmaelan/privatperson--intresseanmaelan> eller <https://www.solcellskollen.se/hitta-leverantor/>

sätt eftersom de som regel är så kallade budgetofferter vilka baseras på ganska grova antaganden. För att konsumenten ska kunna få en vederhäftig investeringskalkyl (kostnad och förväntad intäkt) på en nyckelfärdig anläggning behöver installatören göra en grundlig undersökning av de specifika förutsättningarna genom ett platsbesök eller åtminstone genom att intervjua kunden.

5.7 Klimat- och hållbarhetsaspekter

Sett till en solcellsmoduls hela livslängd är tillverkningen den fas som ger absolut störst påverkan på miljön. Sannolikt är även negativ påverkan på sociala hållbarhetsaspekter störst i tillverkningsfasen. I tillverkningsfasen är det i sin tur främst energianvändningen som bidrar till negativ miljöpåverkan. Det är därför gynnsamt att välja solcellsmoduler som kräver mindre energi vid tillverkning. Typiskt så är tillverkning av tunnfilmsmoduler mindre energiintensiv. Vidare kräver tillverkning av polykristallint kisel mindre energi än monokristallint kisel. Slutligen så är n-typ kisel mindre energikrävande än p-typ kisel²¹.

Vilken påverkan som energianvändningen vid tillverkningen har på miljön beror dock mycket på vilket energislag som används. Den så kallade energimixen kan vara betydligt renare i ett land än i ett annat. För att kompensera för dessa skillnader har dock många fabriker som tidigare drivits med el från till exempel kolkraftverk installerat stora mängder solceller på sina fastigheter. Skillnaden i energiåtgång för att transportera modulerna från fabriken där de tillverkas till platsen de ska monteras på är av mindre betydelse i sammanhanget.

Minst lika viktigt som energianvändningen vid tillverkning är dock hur effektivt solcellsmodulerna används. Vid bra placering är energiåterbetalningstiden, det vill säga den tid det tar för en modul att producera samma mängd energi som gått åt i tillverkningen av den, cirka 1,5 – 2 år. Placeras modulerna under riktigt dåliga förhållanden (skuggning, orientering m.m.) så blir energiåterbetalningstiden betydligt längre.

5.8 Avveckling av solcellsanläggningar

Solcellsanläggningar har långa livstider, på 30-40 år, men det kommer en dag då anläggningen behöver avvecklas. Vid avveckling finns några viktiga saker att tänka på. Till att börja med är demonteringen av en solcellsanläggning ett arbete som kräver en behörig elinstallatör. Sedan ska löpande avtal kopplade till anläggningen och elproduktionen avslutas. Slutligen behöver komponenterna och materialen omhändertas på rätt sätt. Solcellsmodulerna, växelriktare och många andra delar av anläggningen klassas som elektronikavfall, som inte får slängas som vanligt avfall. Vanligt förekommande produkter kan lämnas till en kommunal återvinningscentral, men vissa leverantörer kan ha egna insamlings- och återvinningsystem som kan vara mer specialiserade på vissa typer av solcellsprodukter. Separata system är särskilt vanliga för tunnfilmsmoduler som innehåller små mängder av tungmetallen kadmium (CdTe- och många CIGS-moduler).

5.8.1 Krav på återvinning

Naturvårdsverket är den myndighet som ansvarar för att återvinningen sker enligt de regler som EU har satt upp och som införlivats i svensk lagstiftning. Reglerna innebär att alla som tillverkar eller importerar produkter till Sverige måste teckna avtal med ett insamlingsystem som Naturvårdsverket har godkänt. Avtalet innebär i dagsläget att tillverkaren eller importören ska betala en återvinningsavgift för varje såld produkt till insamlingsystemet. Ett råd är att kolla med leverantören/ installatören om den som importerat produkten är ansluten till systemet. Vill du själv kontrollera detta behöver du alltså veta vilket företag som importerat produkten. Du kan sedan söka på företagets namn hos Naturvårdsverket³⁶. För mer information

³⁶ <http://eeb.naturvardsverket.se/Start/Alla-producenter/>

om avveckling av solcellsanläggningar, se Energimyndighetens Solelportal – Att tänka på vid avveckling eller flytt.³⁷

6 Marknaden för villaanläggningar

Av Tabell 4 framgår att villamarknaden tillsammans med andra mindre fastigheter bidrar med nära hälften av all installerad soleffekt i Sverige^{38, 39}. Villaägarna är alltså en mycket viktig målgrupp för solelbranschen. De senaste årens starka utveckling av den svenska marknaden för solel ser än så länge ut att ha varit relativt oproblematiskt, men en viss ”växtvärk” förekommer. För större installationer finns oftast kompetenta aktörer både på beställar- och leverantörssidan, standardavtal som reglerar ansvarsförhållanden och slutresultatet kontrolleras nästan alltid vid en besiktning.

Tabell 4. Totalt antal anläggningar och installerad effekt inom olika marknadssegment

Installerad effekt [kW]	Antal solcells-anläggningar		Andel [%]	Installerad effekt [MW]	Andel [%]
0-20	21535		84	189	46
20-1000	3941		15	205	50
1000+	10		0,04	17	4
Totalt	25486			411	

När det gäller villamarknaden är situationen delvis en annan då nya leverantörer och installationsföretag hela tiden tillkommer. Detta ökar risken för att det finns installatörer med bristande kompetens. Ett sätt att öka kompetensen hos installatörer är den frivilliga certifieringen enligt förnybartdirektivet. Certifieringen av solcellsinstallatörer har dock inte fått tillräckligt genomslag än och gått långsammare än förväntat. Anläggningsbesök som RISE genomför på Energimyndighetens uppdrag parallellt med denna marknadsöversikt visar på några vanligt förekommande brister. Det gäller frånvaro av dokumentation och märkskyltar, vilket installatören är skyldig att överlämna tillsammans med den färdiga anläggningen, det gäller bristfälligt skyddade kablage på taken och det gäller problem med kommunikationen mellan växelriktaren och omvärlden, till den server där anläggningens produktionsdata lagras och analyseras.

6.1 Installatörerna

Villamarknaden hanteras i dagsläget av installatörer som antingen är klassiska elinstallatörer, ”elektriker” eller det man kallar solcellsinstallatörer. De senare saknar ofta den auktorisation som krävs för att utföra vissa elarbeten och de anlitar då en elinstallatör från en auktoriserad firma för att göra en del av jobbet och till sist ta ansvar för att hela anläggningen uppfyller alla

³⁷ <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/att-tanka-pa-vid-avveckling-eller-flytt/>

³⁸ <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/tillforsel-och-anvandning-av-energi/natanslutna-solcellsanlaggningar/>

³⁹ <https://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/N%3a4tanslutna%20solcellsanl%3a4ggningar/N%3a4tanslutna%20solcellsanl%3a4ggningar/?rxid=5e71cfb4-134c-4f1d-8fc5-15e530dd975c>

tillämpliga krav⁴⁰. Omvänt så saknar elektriker som är nya i solelbranschen ofta en del viktigt kunnande som är specifikt för solelinstallationer, men olika utbildningsinsatser finns numera på plats för att möta detta behov.

I stora drag fungerar installatörsbranschen för den svenska villamarknaden på följande sätt:

De två grupperna installatörer beskrivna ovan, det vill säga elinstallatörer respektive solcellsinstallatörer arbetar i visst avseende på liknande sätt.

- Mindre företag handlar små partier, ofta enstaka anläggningar, från grossist och gör främst villaanläggningar.
- Större företag handlar större partier från grossist, har egna lager av produkter och gör ett stort antal installationer, även utanför villamarknaden. Vissa aktörer har helt valt bort villamarknaden.

På grossistsidan finns en liknande uppdelning.

- Stora grossister köper från fabrik och levererar till solcellsinstallatörer eller elinstallatörer enligt ovan.
- Mindre grossister som köper från fabrik eller från större grossister och sedan säljer som ovan, men i mindre utsträckning till de som lägger upp egna lager. Dessutom säljer de ibland till privatpersoner och installatörer via webbutik.

Ytterligare en typ av aktörer är stora och små energi- eller elhandelsbolag som erbjuder sina kunder paketlösningar. Dessa företag utför som regel inga egna installationsarbeten utan anlitar stora eller små installationsföretag för detta. Ikea som är en ny aktör på solelmarknaden sedan sommaren 2019 kan räknas in i samma kategori. Ikea utför inga installationsarbeten av solcellsanläggningar utan samarbetar med ett större svenskt solelföretag som sköter alla kundkontakter och installerar systemen.

6.2 Ansvarsförhållanden och säkerhetsfrågor

För villaägaren/ beställaren är det viktigt att se till att ansvarsförhållanden kring affären och installationen är tydliga och detta åstadkoms framförallt genom att man skriver avtal med en enda aktör som vid behov kontrakterar andra aktörer. Risken är annars stor att man, OM det uppstår problem, hamnar i en situation där olika aktörer hänvisar till varandra och ingen vill ta ansvar för problemen. Genom att ställa relevanta krav i samband med beställningen⁴¹, vilken till sist ska bekräftas skriftligen, kan man också bidra till att till exempel arbetarskyddsföreskrifter efterlevs och att arbetsvillkoren för installatören i övrigt är anständiga. Energimyndighetens Solelportal kommer under februari 2020 att kompletteras med ytterligare information om upphandling och kravställande.

Viktiga delar i leveransen till villaägare som ofta saknas är som nämnts ovan dokumentation (komponentförteckning och anläggningsschema, protokoll från installatörens egenkontroll, manualer och datablad till växelriktare och moduler, drift- och skötselinstruktion) och märkning av anläggningen (dubbel matning till elcentral, solelanläggning installerad i byggnaden). För villa- och anläggningsägaren är det också viktigt att veta att man i och med att

⁴⁰ Läs mer om kraven på installatörer och skyldigheter för anläggningsägare på <https://www.elsakerhetsverket.se/privatpersoner/saker-el-hemma/ansvaret-ar-ditt/> , <https://e-tjanster.elsakerhetsverket.se/foretag/kolla-elforetaget> och <https://www.elsakerhetsverket.se/yrkespersoner/elinstallationsforetag/arbete-pa-elanlaggning/solcellsanlaggningar/>

⁴¹ En rekommendation är att använda det så kallade "Hantverkarformuläret" för att avtala om affären. <https://www.konsumentverket.se/globalassets/publikationer/kontrakt-och-mallar/hantverkarformularet-2014-konsumentverket.pdf>

anläggningen överlämnats själv har ansvaret om en olycka skulle inträffa. En god idé i sammanhanget är att kontakta sitt försäkringsbolag och den lokala räddningstjänsten för att informera om sina planer innan man sätter dem i verket.

6.3 Forum för mer information

Det finns ett flertal forum för villaägaren att konsultera inför en satsning på solel:

- Energimyndighetens Solelportal samlar myndighetsinformation om tillgängliga stöd, info om ersättning för överskottsproduktion, ett webbverktyg för ekonomikalkyl m.m. <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/>
- Solcellskollen har ett enkelt kalkylverktyg för att uppskatta förutsättningarna för solel på det egna huset, ett sökverktyg för att hitta installatörer i området, feedback från användare, en intressant blogg om förnybar energi m.m. <https://www.solcellskollen.se/>
<https://solcellskollen.se/blogg/dags-att-lagga-om-taket-vi-gar-igenom-nar-takintegrerade-solpaneler-lampar-sig-och-nar-de-inte-gor-det>
- Branschföreningen Svensk Solenergi samlar leverantörer, installatörer, energibolag och fastighetsägare kring kvalitets-, policy och marknadsutvecklingsfrågor. Anslutna företag skriver under på att följa föreningens etiska regler. <https://www.svensksolenergi.se/>
- Bengt Stridh, adjungerad professor vid Mälardalens högskola driver en blogg som riktar sig till villaägare. <http://bengtsvillablogg.info/>
- Skatteverkets information om solel och skattefrågor:
<https://www.skatteverket.se/privat/fastigheterochbostad/mikroproduktionavfornybare/privatbostad.4.12815e4f14a62bc048f41a7.html>
<https://www.skatteverket.se/foretagochorganisationer/skatter/fastighet/mikroprodukti/onafornybarelnaringsfastighet.4.309a41aa1672ad0c837b4e8.html>

RISE Research Institutes of Sweden AB

Energi och cirkulär ekonomi - Hållbara energisystem

Utfört av

Granskat av

Peter Kovacs

Lisa Ossman