

Inlämningsuppgift 3: Hållbara energi- och transportsystem, *Grupp 1 - Solceller*

INTRODUKTION: Världen står inför enorma utmaningar när det gäller klimatförändringarna och energisäkerhet till följd av ökande efterfrågan och sinande oljereserver. I den här uppgiften ska ni fördjupa er i en koldioxidneutral energikälla genom att göra beräkningar och diskutera kring olika aspekter. De tekniker som respektive smågrupp kommer att fördjupa sig i för den här uppgiften är solceller, vindturbiner, bioenergi och kärnkraft.

Uppgiften syftar till att bidra till följande lärandemål för kursen:

- Att kunna beskriva vilka klimatneutrala energitillförselsystem som står till buds idag för att lösa framtidens energiefterfrågan och klimatmål och redogöra för storleksordningarna på dess potentialer
- Att kunna argumentera för de viktigaste för- och nackdelarna med olika klimatneutrala tekniker och deras kritiska begränsningar.
- Att kunna beskriva hur kostnaden för energi påverkas av valet av energikälla.

LITTERATUR: Läs kurslitteraturen som hör ihop med er teknik extra noggrant och leta även gärna efter egen information. Var dock noga med att ange källor för den information ni använder.

OMFATTNING: Tidsmässigt motsvarar denna inlämningsuppgift en arbetsinsats på cirka 20 timmar/person (0,75 hp).

INLÄMNING: Inlämning av svarsrapport ska ske via kurshemsidans funktion för inlämningsuppgifter senast tisdag 2017-05-02 kl 20:00 (dvs, några timmar efter fördjupningstillfället för denna inlämningsuppgift).

BEDÖMNINGSGRUNDER FÖR GOKÄNT & POÄNGSÄTTNING: För att bli godkänd på denna inlämningsuppgift krävs att man besvarat samtliga delfrågor och att man får minst 10 poäng (av maximalt 20) på uppgiften. Poängsättning görs utifrån följande kriterier:

- *Fullständighet och genomförande enligt instruktion* – är hela frågan korrekt besvarad? Är relevanta uppgifter inkluderade?
- *Beräkningar*, är beräkningarna korrekta och noggrant redovisade? Används rätt enheter? Redogörs det för vilka antaganden som gjorts?
- *Resonemang, argumentation och redogörelse* – är de argument som används relevanta, av vikt, och adekvata? Är resonemanget transparent och lätt att följa? Är språket klart och texten begriplig? Finns rena missuppfattningar eller felaktiga påståenden?
- *Förankring i och förhållningssätt till källor* – används ett kritiskt och självständigt förhållningssätt till den förmedlade informationen? Görs relevanta hänvisningar till litteratur och/eller föreläsningar? Visar studenten att den tillgodogjort sig innehållet i kursen?

Bakgrund

Den kumulativa installerade effekten solceller ökar explosionsartat. År 2000 var den globala installerade effekten mindre än 1 GW men var redan uppe i 180 GW i slutet av 2014. Trots att den kumulativa effekten av installerade solceller ökar kraftigt från år till år utgör solet fortfarande bara en liten bråkdel av den totala elproduktionen i världen (<1%) men det finns stora förhoppningar på att solen ska kunna spela en viktig roll i framtiden. I dagsläget finns den största kumulativa installerade effekten i Europa, men det finns även en växande marknad i framförallt Asien. Den största nyinstallationen sker i Kina. Man ska inte glömma att det också finns andra sätt att producera el från solenergi, förutom med solceller. Det finns även termiska processer där värmen från solen utnyttjas för att driva en turbin som i sin tur genererar elström. Denna teknik är dock fortfarande betydligt dyrare än vad solceller är.

Som representanter för solcellsindustrin har ni blivit kontaktade av presidenten för ett litet europeiskt land som överväger att ställa om sitt energisystem från kol och olja till fossilfri energi. Presidenten är ganska väl insatt i de olika teknologierna så det handlar om att ge en balanserad bild av för- och nackdelar och vässa argumenten. Inte minst kommer presidenten att vara intresserad av kostnaderna för er teknologi (jämfört med priset för fossil energi), hur stor yta som behövs för att tillgodose landets energibehov, samt vilken kritik medborgare i landet kan tänkas rikta mot er teknologi. Ni kommer också att behöva sätta er in i era konkurrenters teknologier (bioenergi, vindenergi och kärnkraft) för att kunna ifrågasätta felaktiga påståenden och peka på risker.

Under ett möte med presidenten (för djupningstillfället) kommer ni ges möjlighet att presentera argumenten för er teknologi i cirka 10 minuter, därefter har presidenten och representanterna för de andra teknologierna möjlighet att ställa frågor i 5 minuter. Efter att alla industrier har presenterat fortsätter mötet med en frågestund och därefter fattar presidenten beslut kring vilken teknologi (eller vilken mix av teknologier) han/hon kommer att investera i.

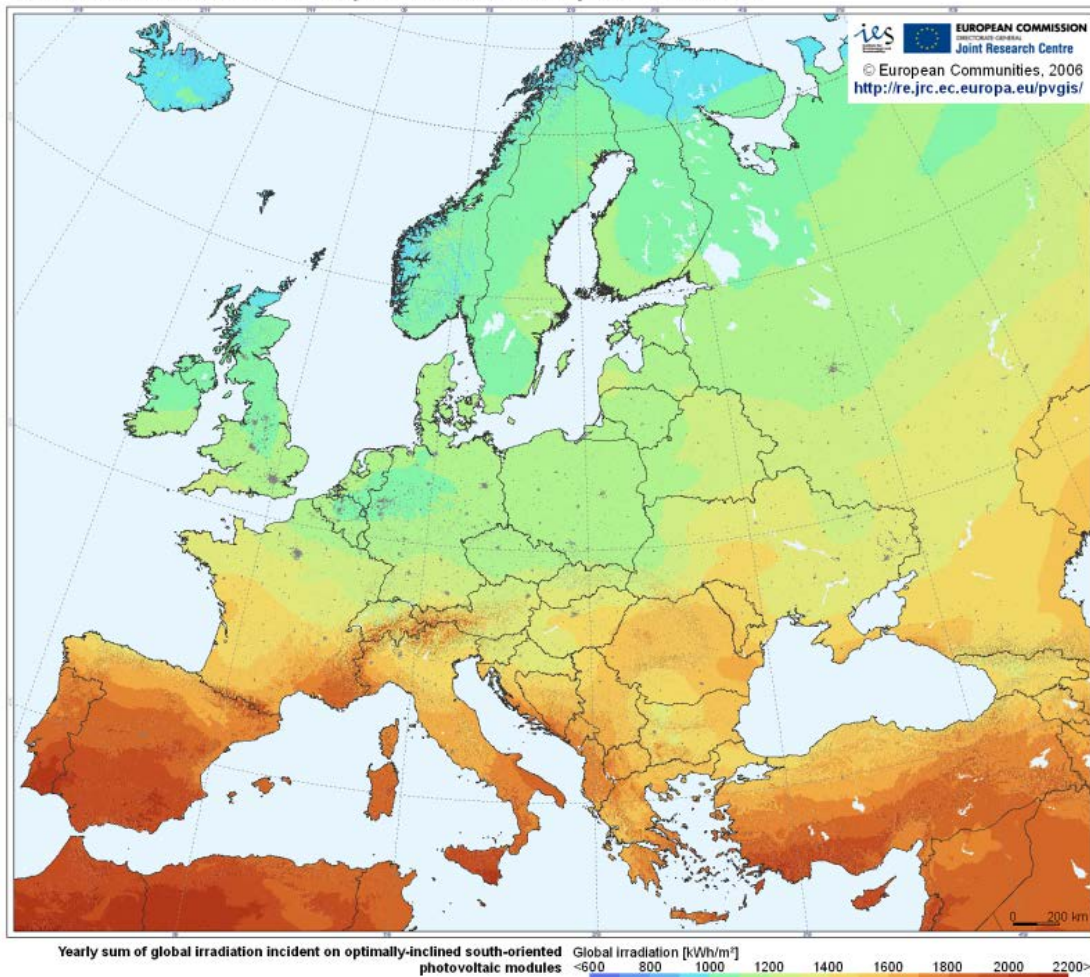
Olika typer av solceller

Solceller kan delas in i två huvudtyper, kristallina kiselceller (c-Si) och tunnfilmsceller (a-Si, CdTe och CIGS). Dessa olika typer av solceller har olika för- och nackdelar.

- Kristallina kiselceller (c-Si) har hög verkningsgrad på uppemot 25 % i laboratoriemiljö och ca 15 % i kommersiella paneler. De produceras av kisel (Si), vilket är det näst vanligaste ämnet i jordskorpan, men det är dyrt och energikrävande att producera kristaller av tillräckligt hög renhet för att de ska gå att använda i en solcell.
- Tunnfilmssolceller av amorft kisel (a-Si) har fördelen att de behöver betydligt mindre material än kristallina kiselceller, för vilka rent kisel utgör den största kostnaden. Amorfa kiselceller (a-Si) produceras av kisel där atomerna inte ingår i kristaller utan ligger oordnade. De har lägre verkningsgrad på drygt 6 %.
- Andra vanliga tunnfilmssolceller är kadmium-tellurid (CdTe) och koppar-indium-gallium-selen (CIGS), som har verkningsgrader ungefär mittemellan de ovan nämnda solcellstyperna. Dessa typer av solceller går att producera till relativt låg kostnad, men är beroende av sällsynta metaller som finns i mycket små koncentrationer och som är biprodukter till annan malmbrytning som styr utvinningstakten.

Solcellspaneler har inte någon självklart begränsad livslängd (solcellerna bryts inte ner med tiden) men man brukar ändå anta att de måste bytas ut efter mellan 20 och 30 år, då lim och annat kan tänkas åldras. Solceller producerar likström och konvertering till växelström ihop med transport av elektriciteten resulterar i energiförluster på mellan 20 och 30 %.

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



Figur 1: Solinstrålning över Europa under ett år. (Med "global irradiation" menas att man inkluderar både direkt och diffust solljus.)

1. Effekt och kapacitetsfaktor

Verkningsgraden på solceller definieras som den del av den instrålade solenergi som omvandlas till elektricitet. Om solen en solig dag lyser med 800 W/m^2 och en solcellspanel har en verkningsgrad på 10 % (d.v.s. $\eta = 0,1 \text{ W}_{el}/\text{W}_{sol}$) så producerar solcellspanelen $80 \text{ W}_{el}/\text{m}^2$. Märkeffekten på en solcellspanel är den effekt den levererar då den belyses med $1000 \text{ W}_{sol}/\text{m}^2$ av direkt solljus. Kapacitetsfaktorn (utnyttjandetiden) är ett nyckeltal som används för att jämföra en panels faktiska produktion under ett år med den teoretiska potentialen. Kapacitetsfaktorn är med andra ord kvoten mellan mängden el som panelen producerar i genomsnitt och märkeffekten, alltså elen som solcellen producerar om den belyses med $1000 \text{ W}_{sol}/\text{m}^2$.

- a) Vad är kapacitetsfaktorn för solcellspaneler i södra Sverige? Antag att en solcells verkningsgrad är konstant så att den producerade elen står i direkt proportion till solinstrålningen. Avläs figur 1 på ett ungefär för att svara på frågan. **(1p)**

- b) Hur stor area solceller behövs för att tillgodose ert eget elbehov med hjälp av c-Si-celler? Titta på era elräkningar efter förbrukning! Verkningsgrad för de olika solcellstyperna finns för 2010 i tabell 1. Antag att panelerna placeras i närheten av Göteborg. Gör rimliga antaganden (med hjälp av figur 1) om solinstrålning. **(1p)**
- c) Hur stor kapacitet solceller (c-Si) skulle behövas för att tillgodose er egen elkonsumention? (Med *kapacitet* menas hur mycket installerad effekt som skulle behövas. Den installerade effekten är summan av solcellernas märkeffekter.) **(1p)**

	Pesimistic			Neutral			Optimistic		
	2010	2020	2040	2010	2020	2040	2010	2020	2040
Efficiency () [%]									
c-Si	14.6%	17.3%	20.0%	14.6%	19.8%	25.0%	14.6%	19.8%	25.0%
CdTe	10.0%	12.5%	15.0%	10.0%	13.3%	16.7%	10.0%	13.3%	16.7%
a-Si/ μ c-Si ^a	6.4%	8.4%	10.5%	9.3%	10.5%	11.7%	9.3%	11.0%	12.6%
CIGS	10.6%	12.2%	13.8%	10.6%	13.2%	15.7%	10.6%	15.0%	19.4%
Thickness of the absorber layer (L) [μ m]									
c-Si	200	180	140	200	160	140	200	160	100
CdTe	3	2.5	2	3	1.4	1	3	1.4	0.8
a-Si/ μ c-Si	1	1	1	2.5	2.4	2.2	2.5	2.4	2
CIGS	2	1.6	1.4	2	1.4	1	2	1.4	0.8
Material utilization rate (UR) in production process [%]									
Si	45%	50%	60%	50%	60%	70%	50%	75%	90%
CdTe	40%	45%	60%	40%	75%	80%	40%	75%	90%
a-Si/ μ c-Si	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
CIGS	40%	45%	60%	40%	75%	80%	40%	75%	90%

Tabell 1: Data för solceller. Källa: Zuser och Rechberger, 2011.

- d) För att producera solceller går det åt ca
- 700 kWh/m² för c-Si
 - 170 kWh/m² för CdTe
 - 360 kWh/m² för CIGS
 - 220 kWh/m² för a-Si

Jämför solceller med kristallint kisel (c-Si) och tunnfilmssolceller med amorft kisel (a-Si). Hur många års elproduktion från respektive solcell motsvarar energiåtgången vid produktionen om cellerna placeras i södra Europa? **(1p)**

2. Effekttäthet

Förnybara energikällor kan räcka under en praktiskt taget obegränsad tidsrymd. En begränsning däremot som kan ha stor betydelse i valet mellan olika förnybara energislag är att de kräver relativt stora markytor. En viktig indikator för förnybara energikällor är därför hur mycket energi, eller effekt (d.v.s. energi per tidsenhet), som i genomsnitt går att få ut per ytenhet från olika energikällor.

- a) I denna uppgift ska ni uppskatta "effekttätheten" (uttryckt i W/m² markyta) som kan fås från c-Si-celler. Dels för södra delen av Sverige (t.ex. Göteborg) och för södra Europa, samt för Sahara. Inkludera i beräkningarna den energi som åtgår internt för själv produktionen av panelerna, d.v.s. beräkningarna ska ge nettoenergibidraget för solcellsel. (Energin som går åt vid tillverkningen av solcellen ska alltså dras bort). Räkna också med att ca 20% av markytan i en solcellspark används till andra ändamål än själva solcellerna, t.ex. vägar. Glöm inte heller energiförlusten vid konvertering till växelström och transport. Räkna med en livslängd på 25 år för panelerna. Information om medelsolinstrålning i Sahara finns t.ex. här: <http://meteonorm.com/download/maps/> **(2p)**

- b) Hur stor area skulle krävas (i södra delen av Sverige, t.ex. Göteborg) för att tillgodose hela Sveriges elbehov med hjälp av c-Si-celler (ca 130 TWh/år)? Hur stor andel av Sveriges yta är det? (Totalt 450 000 km²) **(1p)**

3. Ekonomisk potential

Solceller har länge varit en dyr teknik men har nu minskat kraftigt i pris, mycket tack vare Tysklands stora satsningar på förnybar energi. Investeringskostnaden per kW är fortfarande hög med tanke på den låga kapacitetsfaktorn, men i gengäld kommer bränslet gratis från solen.

Den generella formeln för att räkna ut vad det kostar att producera el från ett kraftverk (per kWh) är

$$\text{Kostnad} = \frac{IK * AF + D\&U}{8760 \frac{h}{\text{år}} * KF} + \frac{BK}{\eta} * 3,6 * 10^{-3} \text{GJ/kWh}$$

IK: Investeringskostnad, [SEK/kW]

D&U: Drift och Underhåll [SEK/kW/år]

AF: Annuitetsfaktorn [år⁻¹]. Andelen av investeringskostnaden som man behöver betala varje år för att täcka ränta och amortering på lånet. Formeln för annuitetsfaktorn är

$$AF = \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^T}}$$

r: ränta på lånet

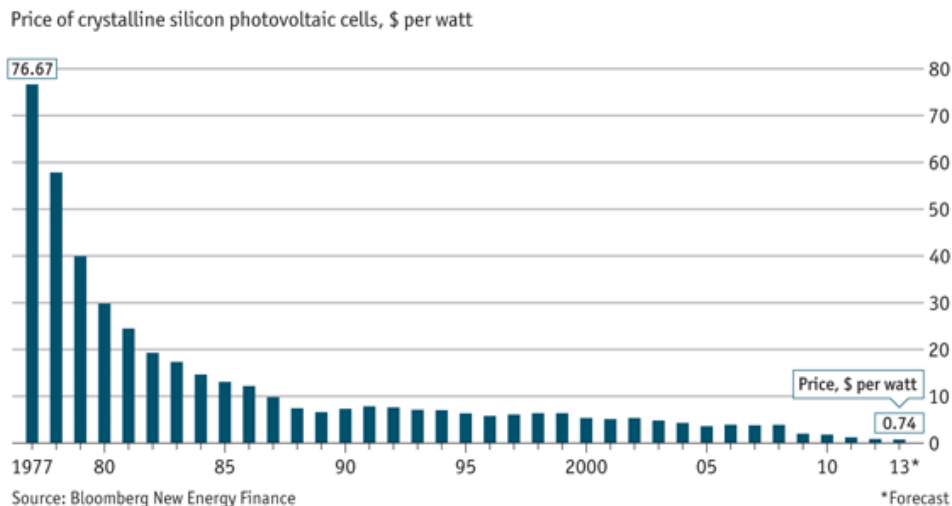
T: kraftverkets ekonomiska livslängd, uttryckt i år

KF: kraftverkets kapacitetsfaktor, hur stor andel av tiden på full effekt som kraftverkets elproduktion motsvarar

BK: bränslekostnad, uttryckt i SEK/GJ (termisk energi)

η : verkningsgrad (andelen elektrisk energi som kraftverket genererar per termisk energienhet i bränslet)

- a) Antag att kostnaden för solcellsmodulerna är 8 SEK/W. Därutöver tillkommer en kostnad på ca 15 SEK/W för det som brukar kallas "balance of system", dvs. kostnad för installation, kablar, spänningskonverterare, etc. Antag att räntan är 7,5 % och den ekonomiska livslängden 25 år. Vad blir kostnaden per kWh att producera el med c-Si-solceller? Jämför med vad du betalar för din el hemma, eller kolla upp hur mycket ungefär det kostar att köpa el från ett energibolag. **(2p)**



Figur 2: Kostnad i US\$ per W (märkeeffekt) för solcellsmoduler.

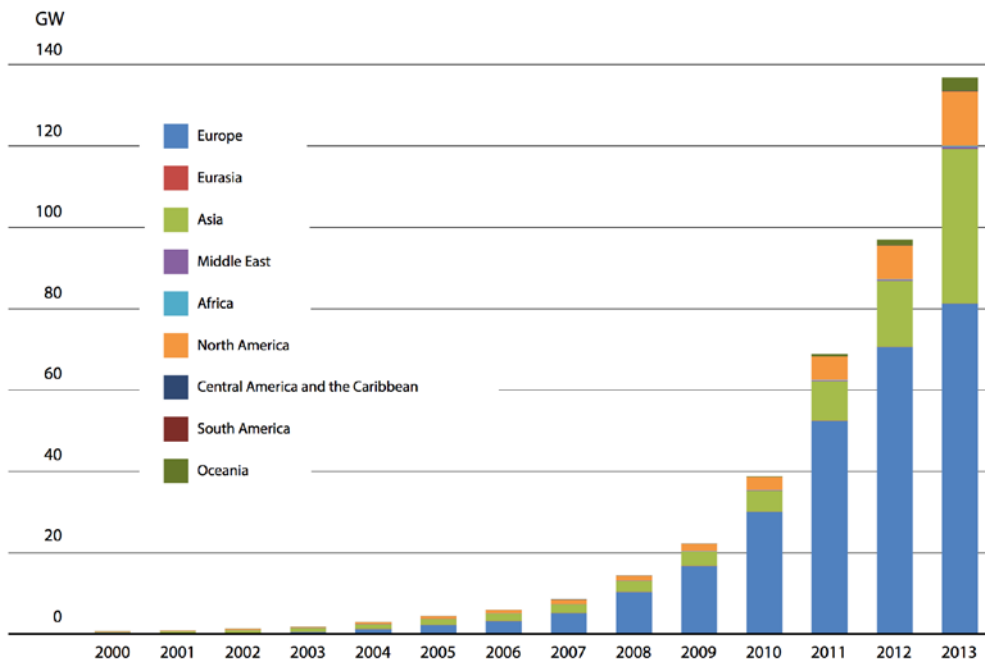
- b) Hur högt skulle priset på utsläpp av koldioxid behöva vara för att solceller skulle bli billigare än kolkraft? (Svara i SEK/ton CO₂). Bränslet kol har ett C-innehåll av 25 gC/MJ. Vid förbränning bildar varje C-atom en CO₂-molekyl. Antag att kapacitetsfaktorn för kolkraftverket är 80%, verkningsgraden från termisk till elektrisk energi är 40%, investeringskostnaden är 20 100 SEK/kW och bränslekostnaden är 28 SEK/GJ. Räkna också med en kostnad på 615 SEK/kW/år för drift och underhåll. (Lägg till den årliga kostnaden för drift och underhåll till den årliga avbetalningen på investeringskostnaden.) Antag åter igen en ränta på 7,5% och en ekonomisk livslängd på kolkraftverket på 40 år. **(3p)**
- c) I Tyskland har installation av solceller växt kraftigt de senaste åren, mycket tack vare feed-in tariffer vilket garanterar solcellsägarna att få sälja sin el till nätet för ett givet pris. Under 2014 stod solceller för 6.2% av landets totala elproduktion. Elpriser brukar variera över dygnet med högre priser på dagen, då efterfrågan på el är större. Föreställ er en sommar dag i Tyskland då solceller producerar 40% av den totala el-efterfrågan. Hur påverkas elpriset vid middagstid den här dagen, blir det högre, lägre eller är det oförändrat, jämfört med vad det skulle varit om all elen producerats från kolkraft istället? Förklara varför! **(2p)**

4. Begränsningar

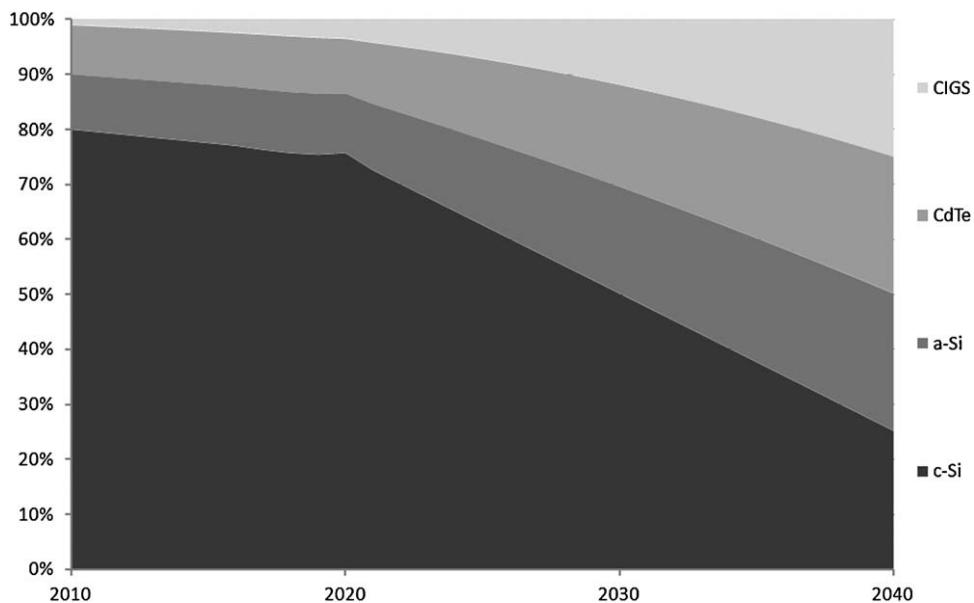
Efterfrågan på elektricitet i världen beräknas bli ca 60 PWh/år vid 2050, vilket är en påtaglig ökning från dagens nivå på ca 20 PWh/år. Antag att 25 % av elektriciteten produceras av solceller vid 2050. Ni ska nu räkna på två olika scenarier, nämligen det optimistiska och det pessimistiska utvecklingsscenariot i tabell 1. I dagsläget produceras mest c-Si-celler men andelen tunnfilmsceller antas öka i framtiden (se figur 4 över de förväntade trenderna). Antag för enkelhetens skull att andelen av de olika solcellstyperna som byggs från och med idag och fram till 2050 är 40 % c-Si, 20 % CdTe, 20 % a-Si och 20 % CIGS och att deras respektive verkningsgrader motsvarar värdena i tabellen för 2040. Antag också förenklat att installerade paneler aldrig behöver bytas ut. Antag vidare att hälften av panelerna placeras i regioner med ganska dåliga förhållanden (t.ex. Sverige och Tyskland) och hälften placeras i regioner närmare ekvatorn, med goda förhållanden.

- a) Hur stor area solceller behövs till år 2050 för att tillgodose efterfrågan? Jämför med Sveriges totala yta. Antag att 20 % av markytan i en solcellspark används till vägar och liknande och därmed inte kan användas för solcellspaneler. Glöm inte heller energiförlusten vid konvertering till växelström och transport. **(2p)**

b) Hur stor solcellskapacitet behöver installeras varje år för att nå 25 % av elektricitetstillförseln till 2050? Antag här linjär utbyggnad, d.v.s. lika stor expansion varje år. **(1p)**



Figur 3: Kumulativ installerad kapacitet solceller. Källa: International Renewable Energy Agency, 2015



Figur 4: Marknadsandelar av nyproducerade solceller över tid. Källa: Zuser och Rechberger, 2011.

5. Sammanfattning – för och nackdelar av de olika konkurrerande teknologierna

Sammanfatta kort (gärna i en tabell) det ni anser vara de viktigaste för och nackdelarna med både er teknologi (kärnkraft) samt dem som era konkurrenter representerar (bioenergi, kärnkraft och vindkraft). **(3p)**

INFÖR FÖRDJUPNINGSTILFÄLLET: Förbered en kort muntlig presentation av er teknik (10 minuter) för de andra i er storgrupp. I presentationen skall ni berätta vilken framtida potential ni tror att er teknik har. Baserat detta på vilka resurser som krävs och tillgången på dem, kostnader för elproduktion med er teknik, risker med tekniken, samt andra fördelar och nackdelar som ni tycker är viktiga. Meningen är inte att ni skall redovisa era beräkningar under presentationen, men ni får gärna visa resultat från dem för att stärka era argument.