

# IMPLEMENTERING AV PV- SYSTEM PÅ TRAFIKVERKETS TEKNIKHUS

Högskoleingenjörsutbildning i Energiteknik  
Inriktning Elkraft

Jimmy Eriksson  
Niklas Klasson



HÖGSKOLAN I BORÅS

## **Förord**

Detta examensarbete är den avslutande delen av högskoleingenjörsutbildningen Energiingenjör – Inriktning Elkraft på Högskolan i Borås. Arbetet genomfördes i samarbete med Sweco Sverige som syftade till att undersöka kring installation av PV-system på Trafikverkets teknikhus.

Vi vill börja med att tacka Sweco Sverige för möjligheten att utföra detta examensarbete i samarbete med dem. Vi vill tacka Soran Tahir Lundberg för utformningen av ett relevant examensarbete och intressanta frågeställningar, samt för handledning under denna tid. Vi vill tacka Harriet Sävebrink för handledning och assistans. Vi vill även tacka Anton Sandgren på Eltek för förmedling av teknisk kunskap kring rectiverters och Per Erik Westbeck på PE Byggtjänst för presentation av solcellsinstallation.

**Program:** Energiingenjörsprogrammet inriktning elkraft

**Svensk titel:** Implementering av PV-system på Trafikverkets teknikhus

**Engelsk titel:** Implementation of PV-systems at the Swedish Transport Administration's signal boxes

**Utgivningsår:** 2021

**Författare:** Jimmy Eriksson, Niklas Klasson

**Handledare:** Soran Tahir Lundberg

**Examinator:** Leif Näslund

**Nyckelord:** Teknikhus järnväg, Solcell, Avbrottsfri kraft, Signalsystem, Rectiverter, PV-system

---

## **Sammanfattning**

Solcellstekniken har funnits sedan lång tid tillbaka och har med en kontinuerlig utveckling vuxit fram till att bli ett rimligt alternativ för kraftförsörjning. Fördelen med solpaneler är dess installationsmöjligheter vilket tillåter installation på outnyttjade ytor så som fasader och tak.

Västlänken är ett stort pågående projekt i Göteborg, projektet innefattar byggnation av nya tågstationer och förläggning av ny järnväg. Detta innebär upprättning av nya teknikhus i anslutning till järnvägen. I samband med detta väcker Sweco Sverige frågan om hur takytorna bäst kan användas på dessa teknikhus.

Syftet med arbetet är att tillsammans med Sweco undersöka vilken effekt som kan genereras av en solcellsanläggning som installeras på teknikhus som är belägna i Göteborg, huruvida installation av ett PV-system är möjlig med den befintliga utrustningen som finns i ett teknikhus och hur stor del av utrustningen i ett teknikhus som kan drivas av den genererade effekten från PV-systemet.

För beräkning av potentiell uteffekt från PV-system användes ett simuleringsprogram framtaget av Energiforsk AB. Gällande installationsmöjligheter fördes direktkontakt med företaget som levererar rectiverter till Trafikverket

Resultatet visar att effekten från ett PV-system är direkt beroende av installationsytan samt verkningsgraden på solcellsmodulerna där uteffekten varierar från 0,10 kW vid lägst verkningsgrad och minst installationsyta till 1,62 kW vid högst verkningsgrad och störst installationsyta. Installation av ett PV-system är ej genomförbar till den befintliga utrustningen i teknikhusen utan måste kompletteras med tilläggsmoduler och solladdare för att systemet ska fungera på ett tillfredställande sätt. Med resultatet kunde lasteffekten för den avbrottsfria kraften och uteffekten från PV-systemet jämföras för Scenario 1 och Scenario 2, då det var för dessa två scenarier som lasteffekten var känd. Andelen av lasteffekten för den avbrottsfria kraften som kan tillgodoseas av ett PV-system beräknades till 1,6 %–10,1 % för Scenario 1 och 2,3 %–18,2 % för Scenario 2.

## **Abstract**

Solar cell technology has been around for a long time and has with continuous development grown to become a viable alternative for power supply. The advantage of solar panels comes with the possibilities for installations on surfaces such as facades and roofs.

Västlänken is a large ongoing project in Gothenburg, the project includes the construction of new train stations and the construction of a new railway. This includes the establishment of new signal boxes along the railway. In conjunction with this, Sweco Sweden has raised the question of how to best utilize the roof of these signal boxes.

The purpose of this thesis is, in cooperation with Sweco Sweden, to investigate the potential output power that can be generated by a photovoltaic system once installed on the signal boxes located in Gothenburg, whether installation of a PV system is possible with the existing equipment in a signal box and how much of the equipment in the signal box that can be powered by the PV-system.

For the calculation of potential output power from PV-systems, a simulation program designed by Energiforsk AB was used. Regarding the installation options a direct contact with the company that supplies rectifiers to the Swedish Transport Administration was established.

The results shows that the output power of PV-systems depends on the installation area and the efficiency of the photovoltaic modules. The output power varies from 0.10 kW at the lowest efficiency and the smallest installation area to 1,62 kW at the highest efficiency and largest installation area. Installation of a PV-system is not feasible with the existing equipment in the signal boxes as additional modules and solar chargers are needed for a working system. With the result, the load for the uninterruptible power and the output power from the PV system could be compared for Scenario 1 and Scenario 2, as the load was known for just these two. The part of the load that can be met by the PV-system was calculated to be 1,6 %–10,1 % for Scenario 1 and 2,3 %–18,2 % for Scenario 2

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>6</b>
1.1 Bakgrund.....	7
1.2 Syfte.....	7
1.2 Avgränsningar .....	7
<b>2 TEORI</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Fotoelektrisk utveckling</b> .....	<b>8</b>
2.1.1 Heinrich Hertz (1857-1894) .....	8
2.1.2 Wilhelm Hallwachs (1859-1922) .....	8
2.1.3 J. J Thomson (1853-1940).....	9
2.1.4 Philip Lenard (1862-1947) .....	9
2.1.5 Einstein (1879-1955) .....	9
2.1.6 Fotoelektriska effekten .....	10
<b>2.2 Dopning</b> .....	<b>10</b>
2.2.1 N-dopning.....	10
2.2.2 P-dopning .....	11
2.2.3 P-N-övergång vid termisk jämvikt .....	11
2.2.4 P-N-övergång med externt applicerad spänning.....	11
<b>2.3 Typer av solceller</b> .....	<b>12</b>
2.3.1 Monokristallina .....	12
2.3.2 Polykristallina .....	12
2.3.3 Tunnsolceller .....	12
<b>2.4 Signal- och kraftsystem</b> .....	<b>13</b>
2.4.1 Strömriktare .....	13
2.4.2 UPS-system.....	14
2.4.3 Rectifierter .....	16
2.4.4 Batteriladdning.....	16
<b>3 METOD</b> .....	<b>17</b>
<b>4 RESULTAT</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1 Beräkningsprogrammet</b> .....	<b>17</b>
4.1.1 Strålningskomponenter mot det lutande planet.....	18
4.1.2 Tidsomvandling .....	19
4.1.3 Infallsvinkel.....	19
4.1.4 Horisont för det geografiska området.....	19
4.1.5 Direkt solstrålning .....	20
4.1.6 Diffus strålning .....	20
4.1.7 Markreflekterad strålning .....	20
4.1.8 Solcellmodulens verkningsgrad .....	21
4.1.9 Utrustningsförluster .....	21
4.1.10 Fotovoltaisk Kraftomvandling .....	22
4.1.11 Elanvändning och belastningsmatchning .....	23

<b>4.2 Beräkningar .....</b>	<b>26</b>
4.2.1 Scenario 1 [6,5 m].....	27
4.2.2 Scenario 2 [11 m].....	30
4.2.3 Scenario 3 [18 m].....	33
4.2.4 Scenario 4 [24 m].....	36
<b>4.3 Anslutningsmöjligheter .....</b>	<b>38</b>
<b>4.4 Kraftförsörjning av avbrottsfri kraft.....</b>	<b>40</b>
4.4.1 Teknikhus 6,5 m.....	40
4.4.2 Teknikhus 11 m.....	41
<b>5 DISKUSSION .....</b>	<b>43</b>
<b>6 SLUTSATS.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERENSER .....</b>	<b>45</b>
<b>Bil.1</b>	Effektdata för avbrottsfri kraft och PV-system – Scenario 1
<b>Bil.2</b>	Effektdata för avbrottsfri kraft och PV-system – Scenario 2

## Terminologi

**Albedo** – Albedo-talet beskriver reflektionsförmågan hos ett objekt där värdet 1,0 betyder att allt ljus reflekteras och värdet 0,0 betyder att inget ljus reflekteras.

**Avbrottsfri kraft** – Generell term för ett system som förser viktiga komponenter med avbrottsfri kraftförsörjning under en viss tid vid bortfall av ordinarie kraftmatning.

**Azimutvinkel** – Azimutvinkel beskriver solpanelernas riktning med avseende på väderstreck med referenspunkt i söder.

**Deklinationsvinkel** – Deklinationsvinkeln kan liknas vid himmelssfärens latitud-koordinat men som anger vinkeln mellan solen och himmelsekvatorn (ekvatorns projicering på himlen).

**Favoriserad kraft** – Kraftsystem som har minst två, av varandra oberoende, kraftmatningar.

**Fotoelektrisk effekt** – Fysikaliskt fenomen vilket innebär att elektronen emitteras från ämnet vid belysning av elektromagnetisk strålning.

**Kvantum** – Den minsta mängd av en viss energi som kan förekomma.

**Lokala meridianen** – Meridianen i detta sammanhang är en tänkt cirkel på himmelssfären som syftar till att bestämma en stjärnas position. Cirkeln går genom den norra och den södra punkten på horisonten via zenit.

**PV – system** – Från engelskans Photovoltaic system. System som utgörs av en eller flera solceller, växelriktare och annan styrutrustning.

**Teknikhus** – Lokalt placerade mindre hus som med jämna mellanrum finns i anslutning till järnvägen. Ett teknikhus rymmer kritisk utrustning för järnvägssystemets funktion, it-, tele- och signalsystem samt komponenter för reservkraftmatning av dessa system.

**Timvinkel** – Beskriver solens position i förhållande till den lokala meridianen där timvinkeln är vinkelavståndet mellan solen och lokal meridian uttryckt i timmar där en timma är ekvivalent till en vinkel på 15°.

**Utdelar** – En utdel ansvarar över att förse signalobjekt med styrning och kraftförsörjning.

**Valensbandet** – Yttersta elektronskalet i en atom

**Växeldriv** – Utrustning som ställer om tungorna i en järnvägsväxel efter signaler från ställverk.

**Zenit** – Solens högsta punkt på himlen utifrån betraktarens perspektiv.

# 1 INLEDNING

Solen är som känt en förutsättning för liv på jorden, energin som solen bestrålar jorden med är mycket stor. Under ett år är den cirka 10 000 gånger större än mänsklighetens totala energiförbrukning som år 2013 uppgick till hela  $5 * 10^{18}$  joule. Kort sagt så finns det stor potential i att utvinna energi från solinstrålningen.

I en fotovoltaisk cell, vidare känt som solcell, omvandlas solens energirika fotoner direkt till elektrisk energi i form av likspänning. Solcellen är en relativt småskalig kraftförsörjning där en solcell på exempelvis ett armbandsur avger en effekt på några enstaka mW medan de största modulerna vid rätt förhållanden har en maxeffekt på cirka 300 W. Solceller kan kopplas samman och bilda solcellanläggningar som då kan generera större effekter. Ett problem med solcellstekniken är att den historiskt har varit relativt dyr i pris per producerad kilowattimme och att den har en låg verkningsgrad på endast 10–20 %. Trots detta ses tekniken, i vissa fall, som ett mer praktiskt alternativ till kraftförsörjning tack vare att den har andra goda egenskaper. Solcellspaneler kan nämligen placeras lite varstans, exempelvis på ytor som redan används. Tak och fasader är populära installationsunderlag för solcellsanläggningar för både privatpersoner och företag. Med dagens effektivisering och subventioner kan kraftförsörjning med solcellstekniken anses vara konkurrenskraftig.

Solcellspaneler förser användaren med elektrisk energi i form av likström vilket innebär att en växelriktning måste ske för att effekten ska kunna matas ut på ett vanligt elnät. Panelerna kan kopplas direkt till en last om lasten har rätt märkspänning och är anpassad för likströmsmatning. Detta förutsätter dock att lasten som matas av solcellerna endast är i behov av kraft när solen skiner vilket i de flesta fall är orealistiskt. Följaktligen krävs en ackumulering i systemet som kan lagra energin, oftast i form av batterier (G. Sidén 2015).

I takt med att utveckling av solceller skett har intresset för tekniken ökat, vilket har resulterat i att allt fler undersöker hur installation av solceller lämpar sig inom just deras område. Längs med de svenska järnvägarna är teknikhus placerade som innehåller styr- och övervakningssystem för tågtrafiken. Teknikhusen är placerade i anslutning till järnvägen med cirka fem kilometers mellanrum vilket betyder att det finns ett stort antal runt om i Sverige. I takt med att den svenska järnvägen moderniseras och expanderar kommer det att byggas fler teknikhus (Trafikverket 2018). Detta gör att frågan väcks om hur dessa tak bäst kan användas, skulle den effekt som solcellerna potentiellt kan generera vara tillräckligt stor för att motivera installation av dessa?

## 1.1 Bakgrund

Västlänken är ett stort projekt i Göteborg som innebär en ny järnvägsförbindelse för pendel- och regionståg med tre nya stationer i Göteborg. Järnvägen kommer att bestå av ett dubbelspår som förläggs i tunnlar under centrala Göteborg med en total sträcka på cirka 8 km.

Syftet med Västlänken är att effektivisera kollektivtrafiken genom att resenärer sprids ut på fler stationer och slipper byta färdmedel för att nå sin slutdestination. Särskilt intressant för detta arbete är de teknikhus av varierande storlek som byggs i anslutning till järnvägen i projektet för Västlänken. I samband med projektet för Västlänken vill Sweco Sverige undersöka möjligheten till att installera PV-system på teknikhusens takytor. Västlänken förväntas vara klar år 2026 (Trafikverket 2018).

Det via avrop upphandlade systemet för avbrottsfri kraftförsörjning av den kritiska utrustningen i teknikhusen är i skrivande stund rectiverter-systemet. Den avbrottsfria kraften används för försörjning av utdelar, enskilda skåp och andra viktiga signalobjekt. Rectiverter-systemet ingår i det kraftnät som benämns som favoriserat nät hos Trafikverket och har således två av varandra oberoende inmatningsvägar (Trafikverket 2019).

## 1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att undersöka möjligheten att utrusta de teknikhus som byggs i projektet för Västlänken med solceller för att sedan eventuellt applicera lösningen på fler ställen i Sverige. I arbetet ska framför allt tre viktiga frågeställningar besvaras. Dessa frågor är följande:

1. Vilken maximal uteffekt kan förväntas av ett PV-system som installeras på teknikhusen?
2. Är installation av ett PV-system möjligt till den redan befintliga utrustningen i teknikhusen?
3. Hur stor del av den avbrottsfria kraften kan tillgodoses med ett PV-system?

## 1.2 Avgränsningar

Avgränsningar för arbetet är följande:

- Geografisk plats begränsas till Göteborg.
- Azimutvinklar begränsas till jämna väderstreck.
- Ekonomi beaktas ej.
- Arbetet är teoretiskt, fysisk inkoppling kommer ej att ske.
- Beräkningarna utförs utifrån den teoretiskt maximala effekten per kvadratmeter takyta, eventuell dödyta vid installation beaktas ej.
- Soltimmar kommer att uppskattas utifrån ett genomsnittligt värde för området och inte specifika adresser.
- Undersökning av installationsmöjligheter kommer att ske på rectiverter och inte UPS.
- Degradering av PV-systemet tas inte med som en parameter i beräkningarna.

## 2 TEORI

Syftet med avsnitt 2 är att ge läsaren grundläggande kunskaper inom ett antal områden som bedöms vara relevanta för att bättre förstå arbetet i sin helhet.

### 2.1 Fotoelektrisk utveckling

Den fotoelektriska effekten noterades första gången av den franska fysikern Edmund Becquerel år 1839 som upptäckte att vissa material kunde producera små mängder av elektrisk ström när det utsattes för solljus (Solenergy 2018). Efter denna upptäckt har den fotoelektriska effekten studerats och utvecklats flera gånger om.

#### 2.1.1 Heinrich Hertz (1857-1894)

Den fotoelektriska effekten upptäcktes först av den tyske fysikern Heinrich Hertz år 1887 då han utförde fem experimentella observationer inom spannet av ett decennium. Dessa observationer ledde till upptäckten av den fotoelektriska effekten, röntgenstrålning, radioaktivitet, Zeemaneffekten och elektronen. De tre förstnämnda upptäckarna gjordes av misstag. Hertz observerade den fotoelektriska effekten som en bieffekt när han utförde undersökningar kring ljusets elektromagnetiska vågformer (Hertz 1887).

Upptäckten skedde då han vid ett tillfälle studerade gnistutsläpp som genererades utav potentialskillnader mellan två metallytor. En primär gnista som kommer från en yta genererade en sekundär gnista på den andra ytan. Då sekundär gnistan var svårare att se byggde Hertz ett hölje runt det för att eliminera externt ljus. Detta orsakade dock en förkortning av den sekundära gnistan. Hertz misstänkte först att denna förkortning berodde på en elektrostatisk effekt som uppstod av den delen av höljet som placerades mellan de två gnistorna. Hypotesen avvisades då det visade sig att det inte blev någon kvalitativ skillnad vare sig höljet var en ledare eller isolator. Detta ledde till att Hertz misstänkte att det kan bero på det ljus som avges av den primära gnistan. Hertz utförde därefter en rad med experiment där han bland annat ökade avståndet mellan metallytorna tills gnistorna upphörde att produceras. Hertz belyste sedan ytorna med en närliggande ljusbågslampa vilket resulterade i att gnistorna dök upp igen. Dessa experiment bekräftade Hertz misstankar om att ljus kan ge upphov till gnistor vilket ledde honom till slutsatsen "... Om det observerade fenomenet verkligen beror på ljuset, är det i så fall bara av ultraviolett ljus" (Hertz 1887). Något som senare visade sig inte vara helt korrekt.

#### 2.1.2 Wilhelm Hallwachs (1859-1922)

Nästa steg i utvecklingen av den fotoelektriska effekten skedde år 1888 av Wilhelm Hallwachs. Inspirerad av Hertz arbete, visade Hallwachs att bestrålning med ultraviolett ljus på oladdat metalliskt material resulterar i att materialet erhåller en positiv laddning (Hallwachs 1888). De tidigaste spekulationerna kring denna effekt före upptäckten av elektronen år 1897 var att belysning med ultraviolett ljus orsakar att fläckar av metalliskt damm lämnar metallytan (Lenard 1889).

### 2.1.3 J. J Thomson (1853-1940)

J. J Thomson var år 1899 först med att påpeka att den fotoelektriska effekten som induceras av ultraviolett ljus består utav utsläpp av elektroner från materialet. Thomson började sina fotoelektriska studier genom att mäta förhållandet mellan laddning och massan av partiklar som produceras av ljus. Metoden för detta var detsamma som för tidigare experiment som Thomson utfört på katodstrålar, där partikelstrålarna rör sig genom korsade elektriska och magnetiska fält. Slutsatsen han nådde av sina studier var "Värdet av laddning genom massa i fallet av ultraviolett ljus. . . . är samma som för katodens strålar." (Thomson 1899). 1897 då Thomson startade sina studier på katodstrålar hade han inte kunnat bestämma vare sig massan eller laddningen separat för katodstrålar. Studierna tillät Thomson att göra detta för fotoelektroner vilket ledde till hans andra slutsats: "e är samma i storlek som den laddning som bärs av väteatomen vid elektrolys av lösningar." (Thomson 1899).

Thomsons student Charles Thomson Bees Wilson (1869–1959) upptäckte att laddade partiklar kan för kärnor kondenseras av supermättade vattenångor. Thomson använde denna metod för att bestämma antalet laddade partiklar genom droppräkning. Den totala laddningen bestämdes elektrometriskt. Med denna metod beräknade Thomson att laddningen för en elektron uppkommer till  $e = 6,8 \cdot 10^{-10}$  esu (elektrostatisk enhet) (Thomson 1899).

### 2.1.4 Philip Lenard (1862-1947)

År 1902 studerade Philip Lenard den fotoelektriska effekten med hjälp av ljuset från ljusbågar. Lenard kunde variera intensiteten på ljuskällan med en faktor på tusen. Med detta gjorde han upptäckten som visade att elektronenergin inte är beroende på ljusintensiteten (Lenard, 1902).

### 2.1.5 Einstein (1879-1955)

År 1905 föreslog Einstein den "enklaste bilden" för den fotoelektriska effekten. Ett ljuskvantum ger all sin energi till en enda elektron där energiöverföringen med ett ljuskvantum är oberoende av närvaron av andra ljuskvantum. Einstein noterade också att en elektron som kastades ut från en kropps inre kommer generellt att drabbas utav energiförlust innan den når ytan. Låt E vara elektronenergin för det fall där energiförlusten är noll varpå Einstein föreslog följande förhållande:

$$E_{max} = h\nu - P \quad [2.1]$$

där  $\nu$  är frekvensen för den infallande strålningen med en specifik våglängd, P är arbetsfunktionen för den energi som krävs för att lämna ytan och h är plankskonstant  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Js. Einstein påpekade att ekvationen i Formel 2.1 förklarar Philip Lenards observation av elektronens energiintensitetsoberoende. I denna ekvation utförs dock några stora antaganden, E bör variera linjärt med  $\nu$ , lutningen på (E,  $\nu$ ) är en universell konstant oberoende av naturen för det bestrålade materialet och värdet på lutningen visade sig att vara Plancks konstant vilket härleddes från strålningslagen (Einstein 1905).

### 2.1.6 Fotoelektriska effekten

Fotoner i ljuset har en karakteristisk energi som kallas fotonenergi. Denna energi har ett energiinnehåll som är proportionellt till frekvensen av ljuset. I fotoemissionsprocessen, när en elektron i ett material absorberar energi av en foton och denna energi är större än elektronens bindningsenergi kommer elektronen med stor sannolikt att stötas bort från materialet. Är fotonenergin i stället låg kan elektronen inte fly från materialet.

Med ökande intensitet av lågfrekvent ljus kommer endast antalet lågenergifotoner att öka. Detta resulterar i att inga fotoner med ett energiinnehåll som är tillräckligt stort för att stöta bort elektroner från materialet skapas. Dessutom kommer energin från de emitterade elektronerna endast bero på energin av de enskilda fotonerna och inte intensiteten av det inkommande ljuset.

Fria elektroner kan absorbera vilken energi som helst under bestrålning så länge detta följs av en emission. Elektronen kan anta flera olika kvanttillstånd med olika bindningsenergier i ett material, de kan även klara av energiförlusterna när de stöts bort från materialet. Detta betyder att elektronerna kan inneha ett antal olika kinetiska energier (Physics u.å.).

## 2.2 Dopning

Dopning är en process som innebär att det införs föroreningar i en halvledarkristall för modifiering av konduktiviteten i halvledaren. För halvledarkristaller av kisel är de två vanligaste materialen för dopning bor och fosfor. Andra material som kan användas till dopningsprocessen är aluminium, indium, arsenik och antimon. Dopmedlet integreras i gitterstrukturen i halvledarkristallen. Typen av dopning baseras på antalet valenselektroner som det tillförda ämnet har. Två typer av dopning existerar, p-typ och n-typ. Dopning av p-typ fås vid användandet av ett element som har en valsenlekton mindre än materialet det tillförs till. Dopning av n-typ fås vid användandet av ett element som har en valsenlekton mer än materialet det tillförs till. För kisel innebär detta att för dopning av p-typ används element med 3 valenselektroner och för dopning av n-typ används element med 5 valenselektroner. Då dopningsprocessen ökar antalet laddningsbärare resulterar detta i en ökad konduktivitet. Dopningsprocessen möjliggör att konduktiviteten för de nu "kontaminerade" kiselkristallerna kan öka med en faktor på  $10^6$ .

### 2.2.1 N-dopning

Dopningsämnet med 5 valenselektroner har en yttre elektron mer än kiselatomerna. Fyra av elektronerna binder sig med en kiselatom medan den femte elektronen kan röra sig fritt i strukturen och fungerar då som laddningsbärare. Denna fria elektron kräver mycket mindre energi än de resterande elektronerna för att förflyttas från valensbandet. Ämnen som avger en elektron i dopningsprocessen benämns som en elektrondonator.

Ämnet som används till n-dopning laddas positivt av förlusten av de negativa elektroner som nu är en del av gitterstrukturen, där endast de fria elektronerna kan röra sig fritt. Dopade halvmetaller vars konduktivitet är baserad på fria, negativa, elektroner kallas för n-typ eller n-dopad. De benämns också som majoritetsladdningsbärare på grund utav det högre antalet fria elektroner (Halbleiter u.å.).

### 2.2.2 P-dopning

Dopningsämnen med 3 valenselektroner har en yttre elektron mindre än kiselatomerna, vilket resulterar i att dopningsämnet kan fånga upp en yttre elektron och därmed lämnar dopningsämnet ett "hål" i valensbandet på kiselatomerna. Elektronerna i valensbandet blir då mobila. Dopmedlet fångar då upp en elektron och ämnet blir negativt laddat, dessa dopmedel kallas acceptorer. På grund av positiva hål som skapas vid underskottet av en elektron kallas halvledarna för p-typ eller p-dopade. Tillskillnad från n-dopade halvledare där elektronerna är majoriteten av laddningsbärarna är det i stället hålen som utgör majoriteten i de p-dopade halvledarna (Halbleiter u.å.).

Halvledare som genomgått dopningsprocessen är elektriskt neutrala. Dopning av n- eller p-typ syftar endast på vilken laddningsbärare som utgör majoriteten av laddningsbärarna. Varje laddningsbärare med positiv eller negativ laddning tillhör ett fast negativt eller positivt laddat dopmedel. Mängden av dopningsämnet som tillförs till halvledarkristallen, påverkar antalet laddningsbärare dvs ju större mängder av dopningsämnet som tillförs desto fler laddningsbärare kommer skapas i halvledaren. Svagt dopade kiselkristaller innehåller endast 1 främmande atom per 1 000 000 000 kiselatomer medan högdopade halvledare innehåller till exempel 1 främmande atom per 1 000 kiselatomer (Halbleiter u.å.).

### 2.2.3 P-N-övergång vid termisk jämvikt

P-n-övergången är det område som uppstår mellan n- och p-dopade halvledarkristaller när dessa sätts ihop. I p-n-övergången finns inga fria laddningsbärare, detta då de fria elektronerna i det n-dopade skiktet och hålen i den p-dopade skiktet i närheten av gränssnittet rekombineras med varandra, vilket innebär att elektronerna fyller hålen. Laddningsrörelsen som uppstår vid rekombination sker till följd koncentrationen av laddningsbärare. Detta då det bara finns ett fåtal elektroner i det p-dopade skiktet och endast ett fåtal hål i det n-dopade skiktet. Majoriteten av laddningsbärarna rör sig därefter till motsatt dopad halvledare. För en funktionell p-n-korsning får kristallgittret inte brytas vilket betyder att en enkel "sammanpressning" av de två dopade skikten ej är tillåten (Halbleiter u.å.).

Regionerna nära gränssnittet på p-n-övergången erhåller en laddning på grund av förlusten av laddningsbärare (positiva laddningar i n-skiktet, negativa laddningar i p-skiktet). När laddningsbärare rekombineras uppstår ett gap mellan laddningarna i p- och n-skiktet som kallas utarmningszon. Ju fler laddningsbärare som rekombineras desto större blir utarmningszonen och därmed ökar spänningsskillnaden för n- och p-skikten. Vid en viss storlek på utarmningszonen blir spänningsskillnaden så hög att rekombinationen mellan laddningsbärare avstannar, vilket betyder att ämnets ledningsförmåga upphör. För kisel ligger denna gräns på 0,7 V. En p-n-övergång kan representera en elektrisk komponent med funktionen att tillåta en elektrisk ström i en riktning, likt en diod (Halbleiter u.å.).

### 2.2.4 P-N-övergång med externt applicerad spänning

Om en positiv extern spänning appliceras på det n-dopade skiktet och en negativ extern spänning på det p-dopade skiktet kommer det elektriska fältet inuti halvledaren röra sig i samma riktning som spänningskällan. Detta förstärker det elektriska fältet vid p-n-övergången. Laddningsbärarna kommer således att dras till vardera av spänningskällans poler vilket resulterar i att utarmningszonen ökar samt att strömflödet förhindras (Halbleiter u.å.).

Vid applicering av den externa spänningen i omvänd riktning resulterar detta i att den interna spänningen inuti halvledaren kommer röra sig i motsatt riktning mot spänningskällan vilket

således kommer försvaga det inre elektriska fältet och reducera utarmningszonen. Om fältet elimineras helt av spänningskällans yttre fält kommer ett ständigt flöde av laddningsbärare från strömkällan till gränssnittet möjliggöras och laddningsbärarna kan rekombineras kontinuerligt. Detta resulterar i att elektrisk ström kan genereras (Halbleiter u.å.).

## **2.3 Typer av solceller**

Solceller kan delas upp i två konstruktions typer, kristallina solceller och tunnfilmssolceller. Kristallina solceller består oftast av kisel och kan konstrueras av en eller flera kiselkristaller (monokristallina eller polykristallina). Tunnfilmssolceller är konstruerade av en eller flera lager av ett tunt fotovoltaiskt material som läggs på exempelvis glas, metall eller plast. Tjockleken på tunnfilmssolceller varierar mellan några nanometer och ett tiotal mikrometer. Solceller genomgår även en dopningsprocess för att öka konduktiviteten i materialet (Sundaram, Benson & Kumar Mallick 2016).

### **2.3.1 Monokristallina**

Monokristallina solceller är tillverkade utav en och samma kiselkristall. Detta resulterar i en nästintill perfekt symmetri för atomerna i kristallen. Symmetrin gör att elektronerna kan röra sig friare vilket betyder att verkningsgraden ökar. Monokristallina solcellspaneler kännetecknas även av deras svarta färg (Sundaram, Benson & Kumar Mallick 2016).

### **2.3.2 Polykristallina**

Polykristallina solceller är tillverkade av flera kiselkristaller, detta resulterar i en relativt osymmetrisk kristallstruktur. Denna struktur gör att polykristallina solceller har något lägre verkningsgrad än monokristallina solceller, då elektronerna inte kan röra sig lika fritt i en osymmetrisk kristallstruktur. Polykristallina solcellspaneler kännetecknas även av deras blåa färg (Sundaram, Benson & Kumar Mallick 2016).

### **2.3.3 Tunnfilmssolceller**

Tunnfilmssolceller klassas som andra generationens solceller och tillverkas genom att flera tunna skikt/film av fotovoltaiskt material likt kadmiumtellurid (CdTe), kopparindiumgalliumdiselenid (CIGS) och amorft tunnfilmskisel (a-Si, TF-Si) som läggs på ett substrat av glas, metall eller plast.

Tjockleken kan variera från några nanometer i storlek till tiotals mikrometer, tillskillnad från de konventionella kristallina kiselsolcellerna vars plattor når upp till 200 mikrometer i tjocklek. Detta resulterar i att tunnfilmssolceller kan används för att bygga integrerade solceller där solceller bland annat kan lamineras på fönster. Tunnfilmsolceller har alltid varit billigare än konventionella kristallina solceller men har en lägre verkningsgrad (Sundaram, Benson & Kumar Mallick 2016).

## 2.4 Signal- och kraftsystem

Ett signalsystem består av olika objekt och undersystem vars främsta uppgift är att styra tågtrafik på ett säkert sätt och att förhindra olyckor. Ett signalsystem består av ett tågskyddssystem och en signalanläggning, signalanläggningen innehåller de komponenter som behövs för att styra tågtrafiken exempelvis: teknikhus, kraftmatning, ställverk, spårledning och kommunikationssystem. Tågskyddssystemet är ett stödsystem som underlättar för lokföraren att hålla rätt hastighet och att stanna vid rätt position. Tågskyddssystemet kan bromsa och stanna tåget om lokföraren inte bromsar i tid, dagens system kallas Automatic Train Control (ATC) (Trafikverket 2019).

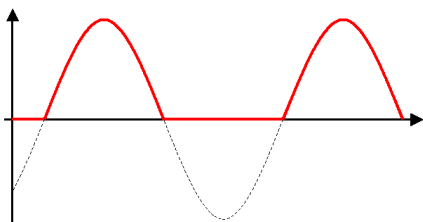
### 2.4.1 Strömriktare

Strömriktare är ett samlingsbegrepp för följande komponenter:

- Likriktare: omvandling från AC till DC.
- Växelriktare: omvandling från DC till AC.
- Frekvensomriktare: omvandling av frekvens i ett AC-nät.
- Liksströmsriktare (DC-DC omvandlare).
- Växelströmsriktare (AC-AC omvandlare).

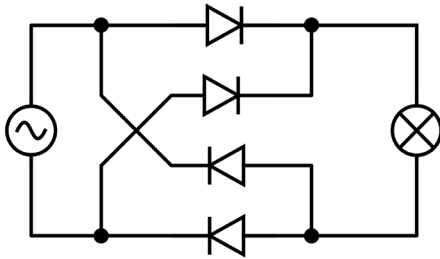
Syftet med en likriktare är att omvandla växelström till likström. I de flesta fall eftersträvas en slät likström eller, som det benämns i kraftelektronikssammanhang, en glättad likström. Likriktaren består i huvudsak av dioder, induktanser och kapacitanser, likriktaren kan delas in i två huvudtyper där antingen halvågslikriktning eller helågslikriktning åstadkoms. Styrningen av en strömriktare och den utgående strömmens egenskaper bestäms av hur många dioder som kopplas samman och i vilket utförande detta görs. Den enklaste typen av likriktning är halvågslikriktningen där endast en diod är placerad mellan växelströmskällan och lasten. Dioden leder endast under strömmens positiva halvperiod och spärrar under dess negativa halvperiod (se figur 1). Över lasten skapas då en pulserande likspänning och likström. För att få en glättning av strömmen så krävs någon form av filter, exempelvis kan en stor induktans seriekopplas med lastresistansen. Detta leder till en mer eller mindre fullt glättad ström i likriktarkretsen.

Halvågslikriktning kan dock generera en förhållandevis stor mängd övertoner i systemet vilket leder till sämre elkvalitet i kretsen. Vid en halvågslikriktning kommer dessutom bara hälften strömmen från växelströmsmatningen till användning i lasten vilket gör att en halvågslikriktning är otillräcklig i de flesta system (Hart 2010).

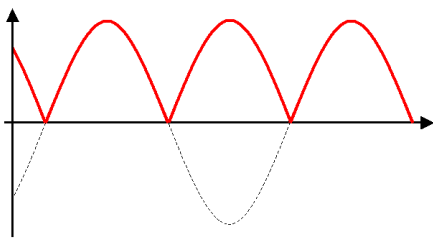


Figur 1 Vågform som uppstår vid en oglättad halvågslikriktning (Zureks 2006a)

Vid helvågslikriktning är dioderna arrangerade enligt Figur 2 vilket gör att strömmen från både den positiva och negativa halvperioden kommer till användning, se Figur 3.



Figur 2 Helvågslikriktarbrygga (MikeRun 2020).



Figur 3 Vågform som uppstår vid en oglättad helvågslikriktning (Zureks 2006b).

Växelriktarens uppgift är att göra om likström till växelström, exempelvis att omvandla en likström med ett batteri som kraftkälla till en 50 Hz växelspanning för matning av ett AC-nät. Ett annat vanligt användningsområde är att utgöra anpassningen mellan solceller och ett elnät. En solcellsanläggning genererar likström och är således i behov av en växelriktare för att mata ut effekten till ett AC-nät. En enkel växelriktare består av minst två brytare som styrs av elektriska pulser, brytarna leder växelvis vilket gör att ström och spänning skiftar polaritet. Detta skapar en våg av AC-karaktär med en positiv och en negativ halvperiod. Resultatet blir dock inte en ren sinuskurva utan liknar de pulser som brytarna styrs av. Ett filter behövs installeras i anslutning till en sådan växelriktare för att reducera övertonerna som produceras och skapa en vågform som är mer lik en sinus (Hart 2010).

## 2.4.2 UPS-system

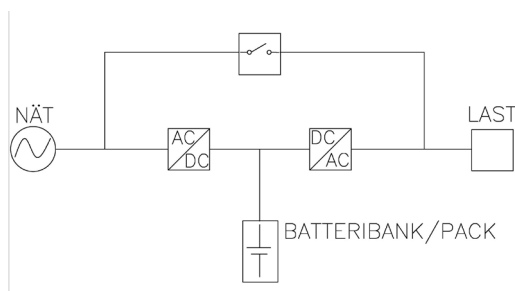
Uninterruptible Power Supply (UPS) är ett system som säkerställer att viktiga elektriska komponenter förses med avbrottsfri kraft. Avbrottsfri kraft innebär inte bara att systemet ska kraftmata kritisk utrustning vid totalt bortfall av den yttre kraftförsörjningen. Ett sådant system behöver, i de flesta fall, även utgöra ett skydd mot stora spänningsvariationer som kan påverka utrustningen negativt. Ett UPS-system består traditionellt utav en likriktare, en växelriktare, batterier och någon form av filter för att få en tillräckligt god växelström till lasten. Det finns i huvudsak tre olika typer av statiska UPS-system, online, off line och line interactive.

Off line-systemet är den enklaste typ av UPS-system där nätspanningen matas via ett filter till lasten, batteriet underhållsladdas med hjälp av en batteriladdare som är ansluten till nätspanningen. Vid normaldrift går matningen genom filtret direkt till lasten samtidigt som det sker en kontinuerlig underhållsladdning av batteriet, i detta läge är växelriktaren helt förbikopplad. Vid totalt bortfall av yttre nätspanning eller störningar på matningen så kommer

nätet att kopplas bort och växelriktaren startar per automatik, batterierna matar nu växelriktaren. Växelriktaren omvandlar batteriets likström till växelström som nu utgör kraftkälla till den kritiska lasten. Denna omkoppling sker med en fördröjning på 2–5 millisekunder vilket innebär att systemet inte är helt och hållet störningsfritt.

Line interactive-systemet är en förfinad typ av off line-systemet där lasten precis som innan förses med kraft via ett filter och där batterier laddas med hjälp av en batteriladdare. Skillnaden är att i detta system är en transformator placerad mellan filter och last, transformatorn har till uppgift att i olika steg automatiskt justera den inkommande nätspänningen. På detta vis klarar ett Line interactive-system att försörja lasten med kraft även vid spänningsvariationer i kraftmatningen. Omkoppling till batteridrift sker endast vid totalt kraftbortfall från den ordinarie matningen.

Online-systemet är något mer avancerat än de två föregående, här sker en dubbel omvandling av ordinarie matning till lasten. Detta sker genom att den inkommande AC-matningen först görs om till likström i en likriktare. Denna likriktare försörjer batteriet med underhållsladdning samtidigt som den är ansluten till en växelriktare. Växelriktaren matar i sin tur den kritiska lasten med växelström, se Figur 4, den dubbla omvandlingen blir i praktiken ett effektivt störningsfilter för den inkommande matningen. Växelriktaren är precis som likriktaren alltid i gång för att försörja lasten med växelström. Utgången på likriktare och batterier är båda inkopplade till växelriktaren, vilket gör att om kraften från nätet skulle utebli tar batteriet över matningen till lasten helt utan avbrott. En statisk bypass, ofta i kombination med en manuell bypass, är inkopplad mellan nät och last. Denna komponent är utrustad med elektronisk logik eller mjukvara som ständigt övervakar växelriktaren. Om spänningen faller efter växelriktaren och nätspänningen är ok så kopplas lasten över till nätspänningen, även detta sker helt utan avbrott. Den manuella Bypass-brytaren gör det möjligt att under drift göra underhåll på UPS-systemet (Batterielektronik u.å.).



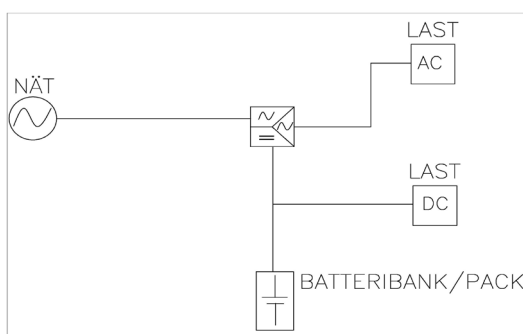
Figur 4 Schematisk bild över Online-systemet med bypass-omkopplare

### 2.4.3 Rectiverter

Rectivertern är en kombinerad likriktare och växelriktare som inte kräver någon statisk omkopplare för överkoppling mellan de olika strömkällorna.

Rectivertern har tre portar, en ingång för växelström, en utgång för växelström och en tvåvägs DC-port för både ingång och utgång av likström. Vid normaldrift tillhandahåller rectivertern både växel- och likström. Växelströmmen likriktas via en integrerad likriktare som sedan matar en växelriktare som förser de nödvändigaste komponenterna med växelström. Den likriktade strömmen matar även en DC/DC-omvandlare som sedan förser de likströmslaster som finns med kraft, exempelvis batterier för underhållsladdning, se Figur 5.

Vid bortfall av växelströmsmatningen så tar batterierna över matningen av anläggningen som då kraftförsörjer växelriktare och eventuell likströmslast. Övergången från AC- till DC-matning sker momentant och helt utan störningar på lasten (Eltek 2016).



Figur 5 Schematisk bild över rectiverter-system

### 2.4.4 Batteriladdning

Förutsättningar för att batterier ska hålla god kvalitet är främst att noga välja batteri utefter det system som batteriet ska implementeras i och att sköta underhållningen av batterierna på ett korrekt sätt. Underhållsladdning utgör en mycket viktig del vid skötsel av batterier och att anpassa strömkällan för laddningen likaså. En felaktig spänningsreglering kan resultera i att batteriet laddas med antingen för hög eller låg spänning vilket påverkar batteriets livslängd och funktion negativt.

För en optimal laddning krävs spänningsreglering som säkerställer en spänning av rätt nivå till batteriet. Detta görs med switchteknik i kombination med ett filter vilket gör laddningen mer robust mot variationer i matningsspänningen. Vid underhållsladdning leds en ofta mycket liten ström genom batteriet för att kompensera för den självurladdning som alltid sker i ett batteri. I moderna batterier är denna självurladdning mycket låg men måste ändå kompenseras för (Svensson 2010).

### 3 METOD

Det är fullt möjligt att göra enklare beräkningar av effektuttaget från en solcellsanläggning med data över total solinstrålning mot det horisontella planet en under viss tid. En sådan enkel uträkning är endast beroende av solinstrålningen, tiden som solstrålningen äger rum, lutningen på solpanelerna och solpanelens egenskaper. En beräkning av sådant slag tar dock inte hänsyn till andra viktiga parametrar, vilket gör att en mer avancerad modell krävs för ett tillförlitligt och mer exakt resultat. Då effektuttaget från en solcellsanläggning varierar mycket med årstid och tid på dygnet så måste detta kompenseras för, vilket kräver timvisa beräkningar under en längre tid. För dessa beräkningar används ett beräkningsprogram, för användning av beräkningsprogrammet behövs information om installationsytan för solpanelerna, denna information går att finna i dokument hos Trafikverket. Sweco tillhandahöll data för teknikhusens lasteffekter för uppskattning av hur stor del av lasteffekten som kan tillgodoses av ett PV-system. Gällande installationsmöjligheterna av solceller till rectivertern erhöles information genom direktkontakt med Eltek AB som vid tillfället var leverantör av rectiverterns.

### 4 RESULTAT

Syftet med detta avsnitt är att besvara de frågeställningar som ställts enligt avsnitt 1.2. Resultatet uppdelas i fyra huvudkategorier där 4.1 beskriver beräkningsprogrammet som använts vid beräkningarna i avsnitt 4.2. I avsnitt 4.2 redovisas samtliga effektdata, enligt frågeställning 1, och de beräkningar som utförts med hjälp av beräkningsprogrammet för fyra olika scenarier. I avsnitt 4.3 undersöks möjligheten till installation av ett PV-system till befintlig utrustning i teknikhusen, enligt frågeställning 2. I avsnitt 4.4 beräknas hur stor andel av lasteffekten för den avbrottsfria kraften som kan tillgodoses med ett installerat PV-system, enligt frågeställning 3.

#### 4.1 Beräkningsprogrammet

Det beräkningsprogram som använts för beräkningarna är Solekenomi 1.0 vilket är framtaget av Energiforsk AB, programmet finns fritt tillgängligt via Energiforsks websida. I programmet finns ett antal förprogrammerade, empiriskt framtagna värden som underlättar beräkningarna för användaren men som vid behov kan ändras.

De förprogrammerade värdena är:

- Horisontvinkel.
- Albedo för sommar- och vintertid.
- Solinstrålningen per årstid, månad, geografisk plats och tid på dygnet.
- Solpanelens temperatur.
- Reflektionsförluster.
- Modulförluster och andra systemförluster, utifrån empiriska data.

För att beräkningar ska kunna utföras behöver användaren mata in följande data:

- Solcellens märkeffekt.
- Solcellens modularea.
- Antal solcellsmoduler.
- Geografiskt område för anläggningen.
- Lutningen på solcellspanelerna.
- Azimutvinkel.
- Växelriktarens verkningsgrad

En av modellens basparametrar är global solinstrålning mot det horisontella planet, vilket bestäms med hjälp av SMHI:s STRÅNG-databas. Databasen ger programmet tillgång till en stor mängd data med ett tidsspänn över flera år på ett antal geografiska platser i Sverige. I detta arbete har SMHI:s mätstation i Göteborg använts för samtliga beräkningar. I beräkningsprogrammet utförs kalkylerna med standardiserade formler för följande faktorer:

- Solstrålning mot det lutande planet [4.1]
- Tidsomvandling [4.2], [4.3].
- Infallsvinkel [4.4], [4.5].
- Horisont för det geografiska området [4.6], [4.7].
- Direkt solstrålning [4.8]
- Diffus solstrålning [4.9], [4.10].
- Reflekterad strålning [4.11].
- Solcellsmodulens verkningsgrad [4.12].
- Utrustningsförluster [4.13], [4.14].
- Fotovoltaisk kraftomvandling [4.15], [4.16], [4.17], [4.18], [4.19], [4.20], [4.21].
- Elanvändning och belastningsmatchning [4.22], [4.23], [4.24], [4.25].

#### 4.1.1 Strålningskomponenter mot det lutande planet

Den globala solinstrålningen mot det lutande planet [ $G_T$ ] är den totala strålningen på solpanelerna som utgörs av diffus strålning [ $G_{dT}$ ], strålning från markreflektion [ $G_{gT}$ ] och solstrålningen mot det lutande planet [ $G_{bT}$ ] vilket resulterar i formeln:

$$G_T = G_{bT} + G_{dT} + G_{gT} \quad [4.1]$$

### 4.1.2 Tidsomvandling

Vid solberäkningar måste standardtid omvandlas till soltid vilket görs enligt följande formel:

$$t_s = t_{st} + 4(L_{st} - L_{toc}) + E_n \quad [4.2]$$

Där  $t_{st}$  är standardtiden,  $L_{st}$  är den standardiserade meridianen och  $L_{toc}$  är longitud för platsen.  $E_n$  är en ekvation av tiden som beror på dagen under året, där  $n$  symboliserar en korrektionsfaktor för längden på en soldag.

Soltid återspeglas i något som kallas timvinkel vilket är solens vinkelavvikelse i relation till den lokala meridianen och som har följande samband:

$$\omega = 15 * \left( \frac{t_s}{60} - 12 \right) \quad [4.3]$$

### 4.1.3 Infallsvinkel

Beräkning av infallsvinkeln på solstrålningen kan, oavsett tid på dygnet, beräknas med hjälp av en trigonometrisk funktion av breddgrad  $[\varphi]$ , deklinationsvinkeln  $[\delta]$ , lutningen på solpanelen  $[\beta]$ , azimutvinkeln  $[\gamma]$  och timvinkel  $[\omega]$  som ger uttrycket:

$$\cos \theta = f * (\varphi, \delta, \beta, \gamma, \omega) \quad [4.4]$$

Vid bestämning av solstrålningens infallsvinkel mot det lutande planet kan denna funktion förenklas till följande uttryck:

$$\cos \theta_z = \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \varphi * \sin \delta \quad [4.5]$$

Där  $\theta_z$  är strålningens infallsvinkel då solen befinner sig i zenit.

### 4.1.4 Horisont för det geografiska området

Horisonten bestämmer tiden för soluppgång och solnedgång. För det horisontella planet bestäms timvinkeln, vid solnedgång, genom att sätta  $\theta_z$  till  $90^\circ$  i uttrycket för  $\cos \theta_z$  vilket resulterar i följande formel:

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi * \tan \delta \quad [4.6]$$

Vid en konstant infallsvinkel så definieras timvinkeln i stället genom att sätta  $\theta_z = \theta_h$  där  $\theta_h$  betecknar horisontvinkeln. Vilket ger uttrycket:

$$\cos \omega_s = \frac{\cos \theta_h - \sin \varphi * \sin \delta}{\cos \varphi * \cos \delta} \quad [4.7]$$

#### 4.1.5 Direkt solstrålning

Den direkta solstrålningen mot det lutande planet [ $G_{bT}$ ] är beräknat med hjälp av solstrålningen mot det horisontella planet [ $G_b$ ] och den geometriska faktorn [ $R_b$ ] som kan beskrivas med följande samband:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad [4.8]$$

#### 4.1.6 Diffus strålning

Den diffusa strålningen mot det lutande planet [ $G_{dT}$ ] är beräknat med en allmänt vedertagen modell som kallas Hay and Davis-modellen och som lyder:

$$G_{dT} = G_d * \left( (1 - A_i) * \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + A_i * R_b \right) \quad [4.9]$$

Där  $G_d$  är den diffusa strålningen mot det horisontella planet.  $A_i$  utgör i denna formel förhållandet mellan solstrålningen mot det horisontella planet [ $G_b$ ] och den inkommande kosmiska strålningen [ $G_0$ ], alltså:

$$A_i = \frac{G_b}{G_0} \quad [4.10]$$

#### 4.1.7 Markreflekterad strålning

Den reflekterande strålningen från mark [ $G_{gT}$ ] som träffar ytan på solpanelen är beräknad baserat på hur stor del av ytan som är riktad mot reflektorn. Följande samband används vid uträkning i programmet:

$$G_{gT} = G_{\rho g} * \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad [4.11]$$

Där  $G_{\rho g}$  är reflektorns albedo-tal.

#### 4.1.8 Solcellmodulens verkningsgrad

I solcellsmodulerna sker effektomvandling där effektiviteten för omvandlingen mäts upp vid standardtest förhållanden (STC). Här antas modultemperaturen  $[T_{cSTC}]$  till  $25^\circ$  och solstrålningen mot solpanelen  $[G_{STC}]$  antas vara  $1000 \text{ W/m}^2$ . Under dessa förhållanden genereras effekten  $P_{STC}$  vilket ger att referensverkningsgraden kan skrivas som:

$$\eta_{STC} = \frac{P_{STC}}{A_m * G_{STC}} \quad [4.12]$$

$A_m$  representerar modularean.

#### 4.1.9 Utrustningsförluster

För att få en korrekt uppskattning av den genererade effekten från en solcellsanläggning så måste förluster för hela anläggningen vägas in. Externa förluster så som nedsmutsning och skuggning av panelerna ersätts med en korrektionsfaktor som antas vara konstant i samtliga beräkningar oavsett förutsättningar, korrektionsfaktorn betecknas  $q_{add}$ .

Verkningsgradsförluster tillkommer vilket gör att de totala förlusterna skrivs som  $1 - q_{add}$  multiplicerat med den totala verkningsgraden för systemkomponenterna  $[\eta_c]$  och den temperaturkorrigerade verkningsgraden för solcellerna  $[\eta_e]$ . Uttrycket för maximal utgående effekt  $[P]$  från solcellssystemet blir då följande:

$$P = N * A_m * \hat{G}_T * (1 - q_{add}) * \eta_c * \eta_e \quad [4.13]$$

Där  $N$  är antal solcellsmoduler, och  $\hat{G}_T$  är den totala globala solstrålningen mot det lutande planet efter reflektionsförluster. Eftersom effekten från en solcellsanläggning kraftigt varierar under dygnet och årstiden så används normaliserad effekt  $[P_p]$  som utgående värde enligt formeln:

$$P_p = \frac{P}{N * P_{STC}} \quad [4.14]$$

#### 4.1.10 Fotovoltaisk Kraftomvandling

Mängden av absorberad strålning beror på infallsvinkeln. Vid ökande infallsvinkel minskar strålningen som absorberas och vid en infallsvinkel som överstiger 60° reflekteras en markant mängd av strålningen från solpanelens yta. Vinkelberoendet beskrivs av infallsvinkelmodifieraren (IAM) [ $K_{\tau\alpha}$ ], vilket är förhållandet mellan absorberad solstrålning vid en viss infallsvinkel gentemot den absorberade solstrålningen vid en normal infallsvinkel (vinkelrätt mot solen). Vilket resulterar i en femtegrads polynomfunktion:

$$K_{\tau\alpha} = \sum_{i=0}^5 b_i \theta^i \quad [4.15]$$

Koefficienten  $b_i$  är framtagen från empiriska mätdata vilket ger följande modifierade strålningskomponenter:

$$\hat{G}_{bT} = K_{\tau\alpha}(\theta) * R_b * G_b \quad [4.16]$$

$$\hat{G}_{dT} = G_d * \left( K_{\tau\alpha}(\theta_d) * (1 - A_i) * \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + K_{\tau\alpha}(\theta) * A_i * R_b \right) \quad [4.17]$$

$$\hat{G}_{gT} = K_{\tau\alpha} * (\theta_g) * G\rho_g * \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad [4.18]$$

Där [ $\theta_d$ ] och [ $\theta_g$ ] är effektiva infallsvinklar för diffus respektive markreflekterad strålning. Dessa är i sin tur relaterade till solpanelernas lutning [ $\beta$ ] enligt följande:

$$\theta_d = 59,7 - 0,13388 \beta + 0,001497 \beta^2 \quad [4.19]$$

$$\theta_g = 90 - 0,5788 \beta + 0,002693 \beta^2 \quad [4.20]$$

Den totala infallande strålningen som träffar det lutande planet med beräknade reflektionsförluster blir då:

$$\hat{G}_T = \hat{G}_{bT} + \hat{G}_{dT} + \hat{G}_{gT} \quad [4.21]$$

#### 4.1.11 Elanvändning och belastningsmatchning.

För följande definitioner antas det att årliga belastnings- och solcellproduktionsserier med timmupplösning finns,  $L_i$  och  $P_i$  där  $i$  antar ett värde mellan 1 och 8760 uttryckt i timmar. Nettoproduktionen och nettolasten är därmed:

$$\tilde{P}_i = \max[0, P_i - L_i] \quad [4.22]$$

$$\tilde{L}_i = \max[0, L_i - P_i] \quad [4.23]$$

Där  $L_i$  är belastningen,  $P_i$  är den effekt som solcellerna producerar och  $[\sim]$  anger nettovärde. Och den matchande delen som det fotovoltaiska systemet täcker är:

$$P_i - \tilde{P}_i = L_i - \tilde{L}_i \quad [4.24]$$

Av detta kan den årliga solfraktionen (kvoten mellan solcellernas uteffekt och last) av systemet erhållas som:

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^{8760} (P_i - \tilde{P}_i)}{\sum_{i=1}^{8760} L_i} \quad [4.25]$$

(Widén, J 2010)

## Symbolförteckning

Symbol	Enhet	Förklaring
$G_T$	[W/m <sup>2</sup> ]	Global solstrålning mot det lutande planet
$G_{bT}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Solstrålning mot det lutande planet
$G_{dT}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Diffus strålning mot det lutande planet
$G_{gT}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Strålning från reflektion mot det lutande planet
$t_s$	[h]	Soltid
$t_{st}$	[h]	Standardtid
$L_{st}$	[°]	Standardiserade meridianen
$L_{toc}$	[°]	Lokal longitud
$E_n$	[-]	Tidsekvation
$\omega$	[h]	Timvinkel
$\theta$	[°]	Infallsvinkel
$\varphi$	[°]	Breddgrad
$\delta$	[°]	Deklinationsvinkel
$\beta$	[°]	Solpanelens lutning
$\gamma$	[°]	Azimutvinkel
$\theta_z$	[°]	Infallsvinkel då solen står i zenit
$\omega_s$	[h]	Timvinkel vid solnedgång
$\theta_h$	[°]	Horisontvinkel
$R_b$	[-]	Geometrisk faktor
$G_b$	[W/m <sup>2</sup> ]	Solstrålning mot det horisontella planet
$G_d$	[W/m <sup>2</sup> ]	Diffus strålning mot det horisontella planet
$A_i$	[-]	Anisotropiskt index
$G_{\rho g}$	[-]	Albedo-tal

$P_{STC}$	[W]	Solcellsmodulens uteffekt vid STC
$\eta_{STC}$	[-]	Solcellsmodulens verkningsgrad vid STC
$A_m$	[m <sup>2</sup> ]	Modularea
$G_{STC}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Solstrålning på solpanelen vid STC
$P$	[W]	Effekt ut från solcellsanläggningen
$N$	[-]	Antal solcellsmoduler
$G_T$	[W/m <sup>2</sup> ]	Total global solinstrålning mot det lutande planet
$q_{add}$	[-]	Korrektionsfaktor för förluster
$\eta_c$	[-]	Temperaturkorrigerad verkningsgrad för solcell
$\eta_e$	[-]	Verkningsgrad för systemkomponenter
$P_p$	[W]	Normaliserad effekt
$K_{\tau\alpha}$	[-]	Infallsvinkelsmodifierare (IAM)
$b_i$	[-]	IAM polynomkoefficient
$\hat{G}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Strålningskomponent efter reflektionsförluster
$\theta_d$	[°]	Infallsvinkel för diffus strålning
$\theta_g$	[°]	Infallsvinkel för reflekterad strålning
$L$	[W]	Last
$\tilde{P}$	[W]	Nettoproduktion
$\tilde{L}$	[W]	Nettolast
SF	[-]	Solfraktion

## 4.2 Beräkningar

I detta avsnitt redovisas resultatet av samtliga beräkningar som gjorts i simuleringsprogrammet Solekonomi 1.0, i tabell- och diagramform.

Effekten som kan genereras av solcellerna beror främst på solcellsmodulens area, antal moduler, global solinstrålning för den geografiska platsen och verkningsgraden för systemet, vilket beskrivs av formel 4.13. Den globala solstrålningen är summan av ett antal strålningskomponenter mot det lutande planet (formel 4.1). Den direkta solinstrålningen står för majoriteten av summan vilken till stor del beror på strålningens infallsvinkel (formel 4.8). Infallsvinkeln bestäms i sin tur av bland annat azimutvinkel och lutningen på solpanelerna enligt formel 4.4 och 4.5. Då arbetet inte syftar till att utreda enskilda system och data saknas kring verkningsgrad för rectiverter eller växelriktare innebär detta att den totala verkningsgraden ersätts av verkningsgraden för enbart solcellspanelerna. Verkningsgraden för solcellspanelerna beror, enligt formel 4.12, på solpanelernas märkeffekt, solinstrålningen och modularean vid standardtestförhållanden. Med detta i åtanke klargjordes det att den viktigaste indata för bestämning av den genererade effekten är antal solcellsmoduler, modularea, azimutvinkel, lutning på solpanelerna och solcellsmodulens effekt vid STC (märkeffekt).

Vid simulering antas modularea, geografisk plats och lutning på solpanelerna vara konstanta. Modularea bestäms till  $1,7 \text{ m}^2$ , då detta är standard för de flesta solcellsmoduler (HemSol 2021), geografisk plats bestäms till Göteborg då det är där samtliga teknikhus kommer att placeras och solpanelernas lutning bestäms till  $10^\circ$  då detta finns specificerat i konstruktionsunderlaget för teknikhusen. Eftersom modularea antas vara konstant så kommer antalet solcellsmoduler variera med takarean. Beräkning sker på en sida av taket åt gången, vilket innebär att halva takarean för respektive scenario används som indata. För att begränsa omfattningen av beräkningarna valdes fyra olika värden för azimutvinkel som representerar de fyra väderstrecken  $-90^\circ$  (öst),  $90^\circ$  (väst),  $0^\circ$  (syd) och  $180^\circ$  (nord). För takytans maximala uteffekt summeras effekten av två av dessa väderstreck antingen nord + syd eller öst + väst. Solcellsmodulernas märkeffekt bestämdes till åtta värden mellan 100 W och 400 W.

Uträkningarna utförs med avsikt att ta reda på den teoretiskt maximala effekt som kan genereras av ett PV-system. Därför antas det att hela takytan, i samtliga scenarier, kan täckas med solceller och eventuell ”dödyta” som uppstår vid installation exkluderas i beräkningarna. Alla beräkningar sker på årsbasis, dvs. att i kolumnen för kWh representerar kWh/år och kolumnen för kW är en genomsnittlig effekt under ett år.

#### 4.2.1 Scenario 1 [6,5 m]

Scenario ett utgår ifrån ett teknikhus beläget nära Västlänken som har dimensionen 6,5x2.92 m (längd x bredd) och en takyta på 19,27 m<sup>2</sup> vilket ger beräkningsarean 9,635 m<sup>2</sup>. Givet en modulstorlek på 1,7 m<sup>2</sup> avrundas antalet moduler till 5 stycken då:  $N = \frac{9,635}{1,7} = 5,66 \text{ st.}$

Då azimutvinkeln antar värdet -90° (öst) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 1

Tabell 1 Resultat av beräkningar med azimutvinkel -90° för scenario 1

Östsida	Märkeffekt			
	W (Solcell)	kWh	kW	η (%)
	100	440	0,050228	5,88
	150	660	0,075342	8,82
	200	880	0,100457	11,76
	250	1100	0,125571	14,71
	300	1320	0,150685	17,65
	350	1540	0,175799	20,59
	400	1760	0,200913	23,53

Då azimutvinkeln antar värdet 90° (väst) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 2.

Tabell 2 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 90° för scenario 1

Västsida	Märkeffekt			
	W (Solcell)	kWh	kW	η (%)
	100	447	0,051027	5,88
	150	670	0,076484	8,82
	200	893	0,101941	11,76
	250	1116	0,127397	14,71
	300	1340	0,152968	17,65
	350	1563	0,178425	20,59
	400	1786	0,203881	23,53

Då azimutvinkeln antar värdet 0° (syd) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 3.

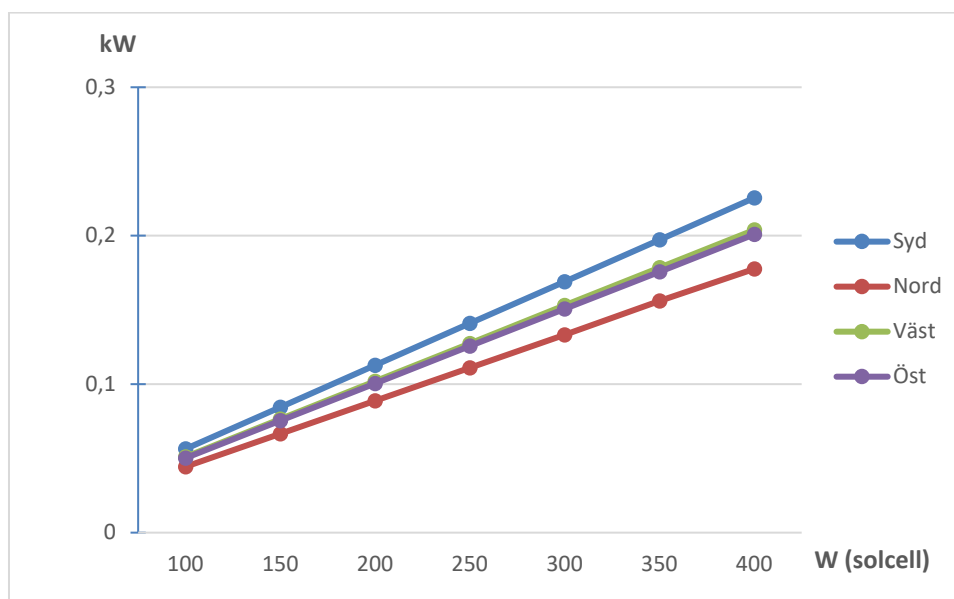
Tabell 3 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 0° för scenario 1

Sydsida	Märkeffekt			
	W (Solcell)	kWh	kW	η (%)
	100	494	0,056393	5,88
	150	741	0,084589	8,82
	200	988	0,112785	11,76
	250	1235	0,140982	14,71
	300	1481	0,169064	17,65
	350	1728	0,19726	20,59
	400	1975	0,225457	23,53

Då azimutvinkeln antar värdet 180° (nord) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 4.

Tabell 4 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 180° för scenario 1

Nordsida	Märkeffekt		kW	η (%)
	W (Solcell)	kWh		
	100	389	0,044406	5,88
	150	583	0,066553	8,82
	200	778	0,088813	11,76
	250	972	0,110959	14,71
	300	1167	0,133219	17,65
	350	1367	0,15605	20,59
	400	1556	0,177626	23,53



Figur 6 Grafisk sammanställning av effektdata i Tabell 1–4

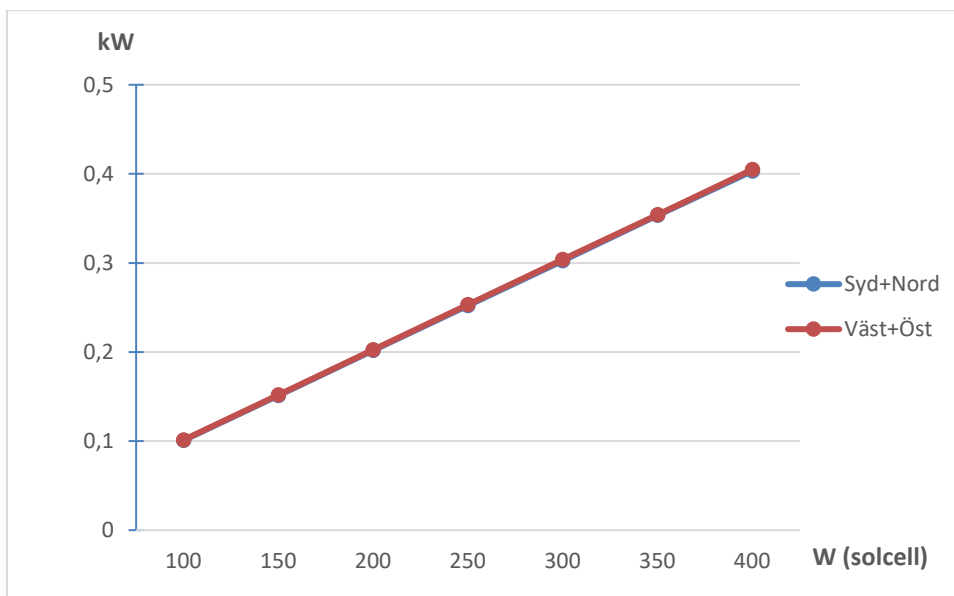
Summering av effekter för två väderstreck redovisas i Tabell 5 och Tabell 6.

Tabell 5 Summering av resultat från Tabell 1 och Tabell 2 för vardera märkeffekt

Väst + Öst	Märkeffekt		kW
	W (Solcell)	kWh	
	100	887	0,101256
	150	1330	0,151826
	200	1773	0,202397
	250	2216	0,252968
	300	2660	0,303653
	350	3103	0,354224
	400	3546	0,404795

Tabell 6 Summering av resultat från Tabell 3 och Tabell 4 för vardera märkeffekt

Syd + Nord	Märkeffekt W (Solcell)	kWh	kW
	100	883	0,100799
	150	1324	0,151142
	200	1766	0,201598
	250	2207	0,251941
	300	2648	0,302283
	350	3095	0,353311
	400	3531	0,403082



Figur 7 Grafisk sammanställning av effektdata i Tabell 5 och Tabell 6

Observera att Figur 7 visar två olika men närmast identiska linjer.

#### 4.2.2 Scenario 2 [11 m]

Scenario två utgår ifrån ett teknikhus beläget nära Västlänken som har dimensionen 11,02x2,92 m och en takyta på 32,7 m<sup>2</sup> vilket ger beräkningsarean 16,35 m<sup>2</sup>. Givet en modulstorlek på 1,7 m<sup>2</sup> avrundas antalet moduler till 7 stycken då:  $N = \frac{13,345}{1,7} = 7,85 \text{ st}$

Då azimutvinkeln antar värdet -90° (öst) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 7.

Tabell 7 Resultat av beräkningar med azimutvinkel -90° för scenario 2

Östsida	Märkeffekt			
	W (Solcell)	kWh	kW	η (%)
	100	792	0,090411	5,88
	150	1188	0,135616	8,82
	200	1584	0,180822	11,76
	250	1980	0,226027	14,71
	300	2376	0,271233	17,65
	350	2772	0,316438	20,59
	400	3168	0,361644	23,53

Då azimutvinkeln antar värdet 90° (väst) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 8.

Tabell 8 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 90° för scenario 2

Västsida	Märkeffekt			
	W (Solcell)	kWh	kW	η (%)
	100	804	0,091781	5,88
	150	1206	0,137671	8,82
	200	1607	0,183447	11,76
	250	2009	0,229338	14,71
	300	2411	0,275228	17,65
	350	2813	0,321119	20,59
	400	3215	0,367009	23,53

Då azimutvinkeln antar värdet 0° (syd) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 9.

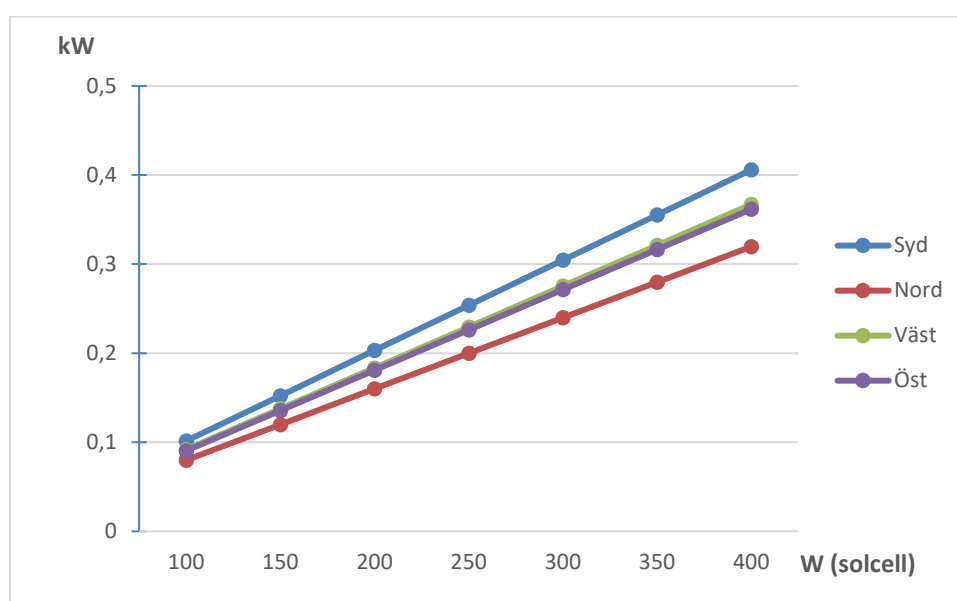
Tabell 9 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 0° för scenario 2

Sydsida	Märkeffekt			
	W (Solcell)	kWh	kW	η (%)
	100	889	0,101484	5,88
	150	1333	0,152169	8,82
	200	1778	0,202968	11,76
	250	2222	0,253653	14,71
	300	2667	0,304452	17,65
	350	3111	0,355137	20,59
	400	3556	0,405936	23,53

Då azimutvinkeln antar värdet 180° (nord) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 10.

Tabell 10 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 180° för scenario 2

Nordsida	Märkeffekt		kW	η (%)
	W (Solcell)	kWh		
	100	700	0,079909	5,88
	150	1050	0,119863	8,82
	200	1400	0,159817	11,76
	250	1750	0,199772	14,71
	300	2100	0,239726	17,65
	350	2450	0,27968	20,59
	400	2800	0,319635	23,53



Figur 8 Grafisk sammanställning av effektdata i Tabell 7-10

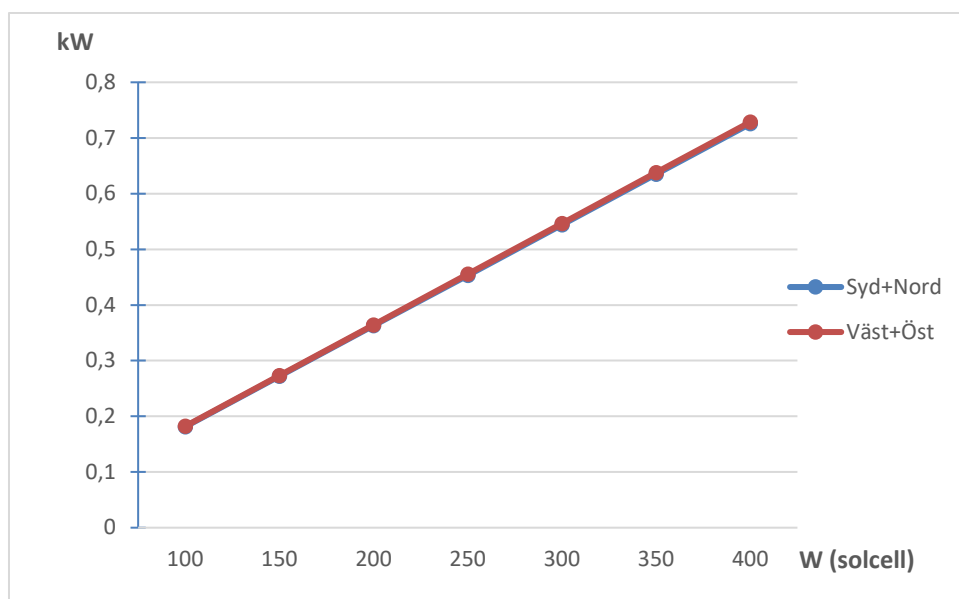
Summering av effekter för två väderstreck redovisas i Tabell 11 och Tabell 12.

Tabell 11 Summering av resultat från Tabell 7 och Tabell 8 för vardera märkeffekt

Väst + Öst	Märkeffekt		kW
	W (Solcell)	kWh	
	100	1596	0,182192
	150	2394	0,273288
	200	3191	0,364269
	250	3989	0,455365
	300	4787	0,546461
	350	5585	0,637557
	400	6383	0,728653

Tabell 12 Summering av resultat från Tabell 9 och Tabell 10 för vardera märkeffekt

Syd + Nord	Märkeffekt		
	W (Solcell)	kWh	kW
	100	1589	0,181393
	150	2383	0,272032
	200	3178	0,362785
	250	3972	0,453425
	300	4767	0,544178
	350	5561	0,634817
	400	6356	0,725571



Figur 9 Grafisk Sammanställning av effektdata i Tabell 11 och Tabell 12

Observera att Figur 9 visar två olika men närmast identiska linjer.

### 4.2.3 Scenario 3 [18 m]

Scenario tre utgår ifrån ett montage av två teknikhus ihop belägna nära Västlänken som sammanlagt får dimensionen 18x2.92 m och en takyta på 53,28 m<sup>2</sup> vilket ger beräkningsarean 26,64 m<sup>2</sup>. Givet en modulstorlek på 1,7 m<sup>2</sup> avrundas antalet moduler till 15 stycken då:  $N = \frac{26,64}{1,7} = 15,67 \text{ st}$

Då azimutvinkeln antar värdet -90° (öst) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 13.

Tabell 13 Resultat av beräkningar med azimutvinkel -90° för scenario 3

Östsida	Märkeffekt			
	W (solcell)	kWh	kW	η (%)
100	1320	0,150685	5,88	
150	1980	0,226027	8,82	
200	2640	0,30137	11,76	
250	3300	0,376712	14,71	
300	3960	0,452055	17,65	
350	4620	0,527397	20,59	
400	5280	0,60274	23,53	

Då azimutvinkeln antar värdet 90° (väst) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 14.

Tabell 14 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 90° för scenario 3

Västsida	Märkeffekt			
	W (solcell)	kWh	kW	η (%)
100	1340	0,152968	5,88	
150	2009	0,229338	8,82	
200	2679	0,305822	11,76	
250	3349	0,382306	14,71	
300	4019	0,45879	17,65	
350	4688	0,53516	20,59	
400	5358	0,611644	23,53	

Då azimutvinkeln antar värdet 0° (syd) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 15.

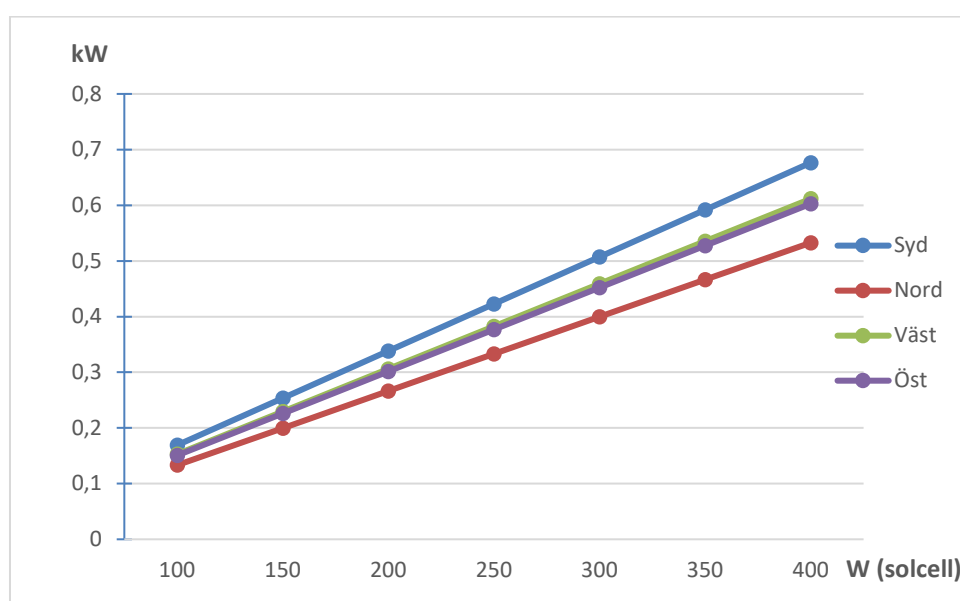
Tabell 15 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 0° för scenario 3

Sydsida	Märkeffekt			
	W (solcell)	kWh	kW	η (%)
100	1481	0,169064	5,88	
150	2222	0,253653	8,82	
200	2963	0,338242	11,76	
250	3704	0,422831	14,71	
300	4444	0,507306	17,65	
350	5185	0,591895	20,59	
400	5926	0,676484	23,53	

Då azimutvinkeln antar värdet 180° (nord) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 16.

Tabell 16 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 180° för scenario 3

Nordsida	Märkeffekt			
	W (solcell)	kWh	kW	η (%)
	100	1167	0,133219	5,88
	150	1750	0,199772	8,82
	200	2334	0,266438	11,76
	250	2917	0,332991	14,71
	300	3500	0,399543	17,65
	350	4084	0,46621	20,59
	400	4667	0,532763	23,53



Figur 10 Grafisk sammanställning av effektdata i Tabell 13–16

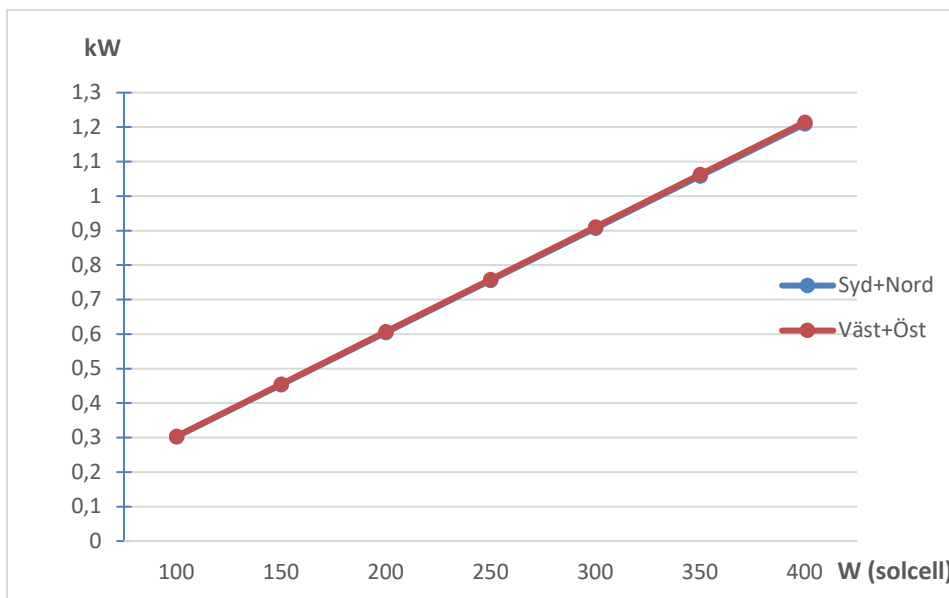
Summering av effekter för två väderstreck redovisas i Tabell 17 och Tabell 18.

Tabell 17 Summering av resultat i Tabell 13 och Tabell 14 för vardera märkeffekt

Väst + Öst	Märkeffekt		
	W (solcell)	kWh	kW
	100	2660	0,303653
	150	3989	0,455365
	200	5319	0,607192
	250	6649	0,759018
	300	7979	0,910845
	350	9308	1,062557
	400	10638	1,214384

Tabell 18 Summering av resultat i Tabell 15 och Tabell 16 för vardera märkeffekt

Syd + Nord	Märkeffekt		
	W (solcell)	kWh	kW
	100	2648	0,302283
	150	3972	0,453425
	200	5297	0,60468
	250	6621	0,755822
	300	7944	0,906849
	350	9269	1,058105
	400	10593	1,209247



Figur 11 Grafisk Sammanställning av effektdata i Tabell 17 och Tabell 18

Observera att Figur 11 visar två olika men närmast identiska linjer.

#### 4.2.4 Scenario 4 [24 m]

Scenario fyra utgår ifrån ett montage av två teknikhus belägna nära västlänken som sammanlagt får dimensionen 24,045x2,92 m och en takyta på 71,2 m<sup>2</sup> vilket ger beräkningsarean 35,6 m<sup>2</sup>. Givet en modulstorlek på 1,7 m<sup>2</sup> avrundas antalet moduler till 20 stycken då:  $N = \frac{35,6}{1,7} = 20,94 \text{ st}$

Då azimutvinkeln antar värdet -90° (öst) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 19.

Tabell 19 Resultat av beräkningar med azimutvinkel -90° för scenario 4

Östsida	Märkeffekt			
	W (solcell)	kWh	kW	η (%)
100	1760	0,200913	5,88	
150	2640	0,30137	8,82	
200	3520	0,401826	11,76	
250	4400	0,502283	14,71	
300	5280	0,60274	17,65	
350	6160	0,703196	20,59	
400	7040	0,803653	23,53	

Då azimutvinkeln antar värdet 90° (väst) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 20.

Tabell 20 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 90° för scenario 4

Västsida	Märkeffekt			
	W (solcell)	kWh	kW	η (%)
100	1786	0,203881	5,88	
150	2679	0,305822	8,82	
200	3572	0,407763	11,76	
250	4465	0,509703	14,71	
300	5358	0,611644	17,65	
350	6251	0,713584	20,59	
400	7144	0,815525	23,53	

Då azimutvinkeln antar värdet 0° (syd) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 21.

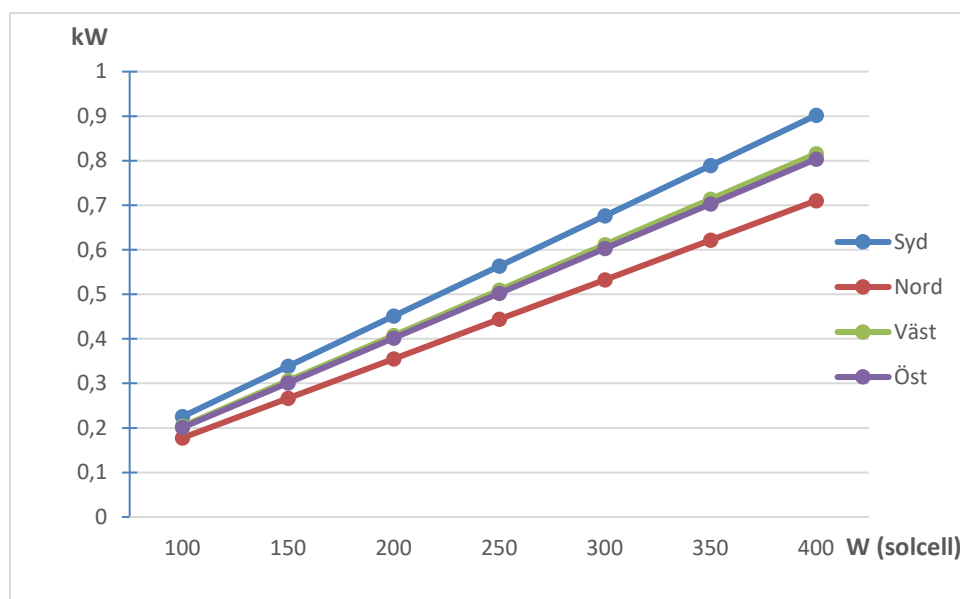
Tabell 21 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 0° för scenario 4

Sydsida	Märkeffekt			
	W (solcell)	kWh	kW	η (%)
100	1975	0,225457	5,88	
150	2963	0,338242	8,82	
200	3951	0,451027	11,76	
250	4938	0,563699	14,71	
300	5926	0,676484	17,65	
350	6914	0,789269	20,59	
400	7901	0,901941	23,53	

Då azimutvinkeln antar värdet 180° (nord) blir resultatet av beräkningen enligt Tabell 22

Tabell 22 Resultat av beräkningar med azimutvinkel 180° för scenario 4

Nordsida	Märkeffekt W (solcell)	kWh	kW	$\eta$ (%)
	100	1556	0,177626	5,88
	150	2334	0,266438	8,82
	200	3111	0,355137	11,76
	250	3889	0,44395	14,71
	300	4667	0,532763	17,65
	350	5445	0,621575	20,59
	400	6223	0,710388	23,53



Figur 12 Grafisk sammanställning av effektdata i Tabell 19–22

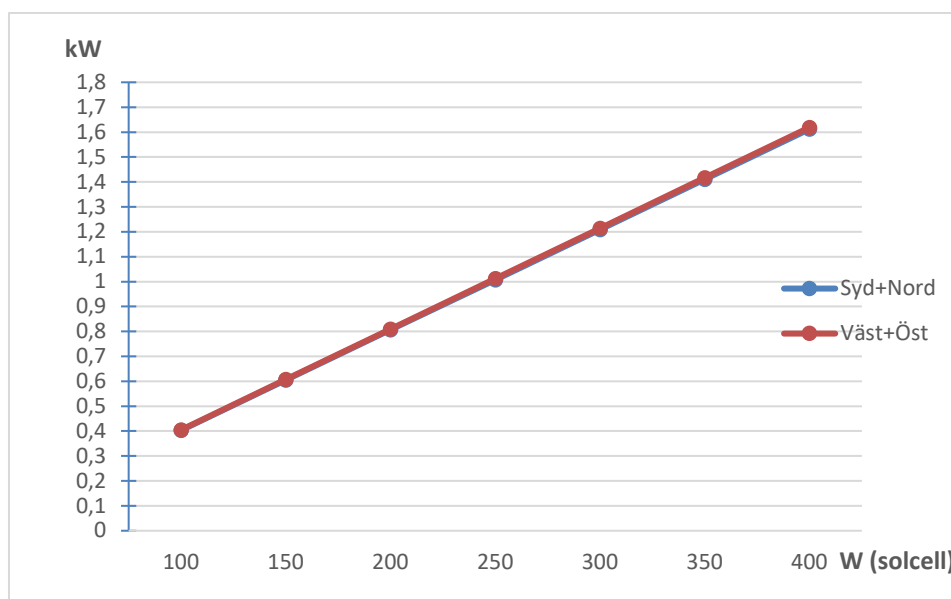
Summering av effekter för två väderstreck redovisas i Tabell 23 och Tabell 24.

Tabell 23 Summering av resultat från Tabell 19 och Tabell 20 för vardera märkeffekt

Väst + Öst	Märkeffekt W (solcell)	kWh	kW
	100	3546	0,404795
	150	5319	0,607192
	200	7092	0,809589
	250	8865	1,011986
	300	10638	1,214384
	350	12411	1,416781
	400	14184	1,619178

Tabell 24 Summering av resultat från Tabell 21 och Tabell 22 för vardera märkeffekt

Syd + Nord	Märkeffekt		
	W (solcell)	kWh	kW
	100	3531	0,403082
	150	5297	0,60468
	200	7062	0,806164
	250	8827	1,007648
	300	10593	1,209247
	350	12359	1,410845
	400	14124	1,612329

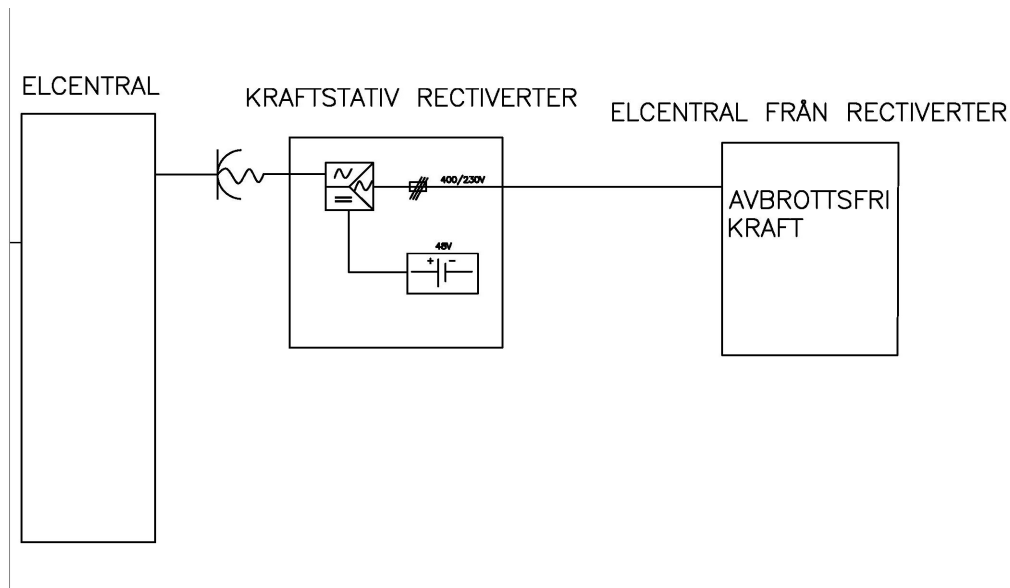


Figur 13 Grafisk sammanställning av effektdata i Tabell 23 och Tabell 24

Observera att Figur 13 visar två olika men närmast identiska linjer.

### 4.3 Anslutningsmöjligheter

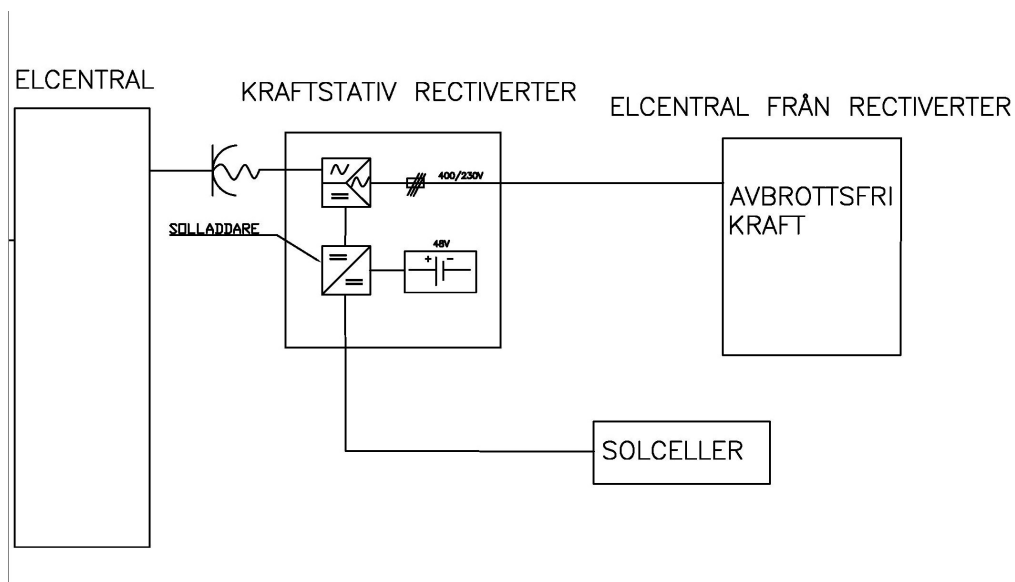
Solkraft är en volatil kraftkälla som beror mycket på yttre omständigheter vid varje givet tillfälle. Detta kan påvisas genom att studera formlerna som ligger till grund för beräkningsprogrammet i avsnitt 4.1. I formel 4.5, 4.7, 4.9 och 4.13 ingår storheter som deklinationsvinkeln, timvinkel, infallsvinkel och förluster som alla påverkas av yttre faktorer. Exempel på detta är tid på dygnet, tid på året och väderlek vilket leder till ett varierat effektuttag från solcellsanläggningen. Detta faktum gör att inkoppling av solceller direkt till batterierna är olämplig eftersom batterier kräver en kontinuerlig och stabil laddning. Batterierna ska dessutom endast underhållsladdas vilket betyder att det bara krävs en mycket liten ström för ändamålet, resten av effekten från solcellerna skulle då gå förlorad. I Figur 14 visas enlinjeschemat för nuvarande system utan PV-installation.



Figur 14 Schematisk bild över nuvarande rectiverter-system.

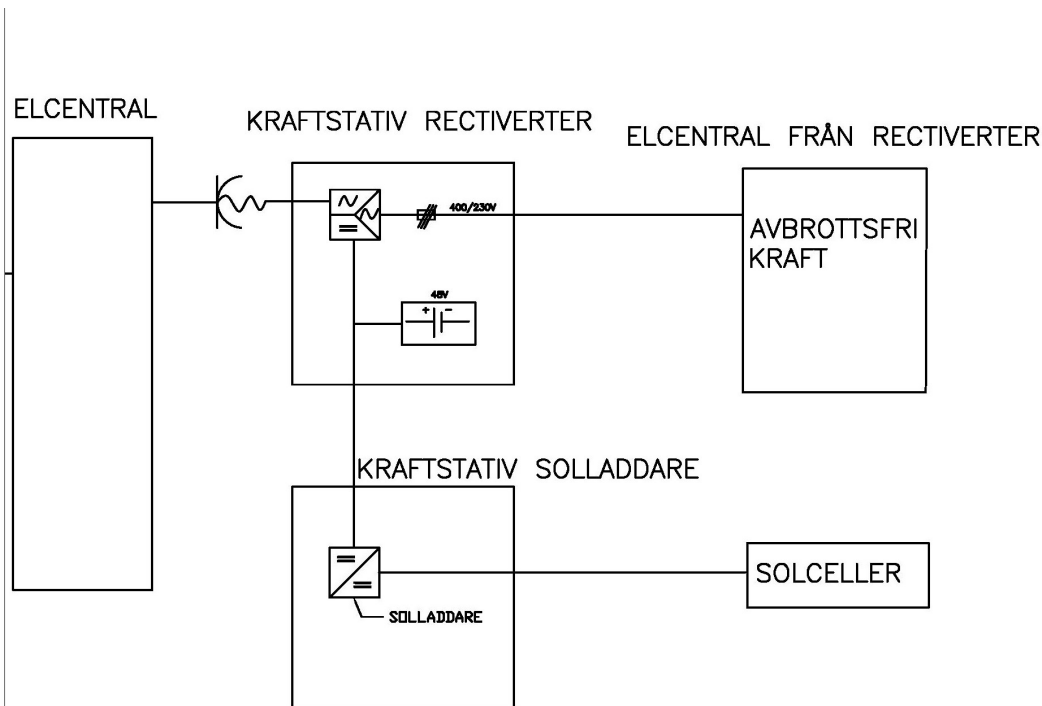
En inkoppling av solcellerna till rectivertern antas efter diskussion med Anton Sandgren<sup>1</sup>, Technical Manager på Eltek vara möjlig med solladdare och tillhörande tilläggsmodul. Dessa Solladdare kopplas till samma DC-bus som DC porten på rectivertern vilket gör det möjligt att reglera och prioritera solcellsanläggningens uteffekt till batterier och rectiverter.

Systemet är uppbyggt på ett sådant sätt att när solcellsanläggningen levererar effekt så prioriteras denna över ordinarie matning till AC- och DC laster samt batteriladdning. Enligt Sandgren så förutsätter detta att det finns plats, i eller i närhet, till det existerande kraftstativet för Solladdarna.



Figur 15 Schematisk bild över rectiverter-systemet med PV-installation

<sup>1</sup> Anton Sandgren, Technical Manager Eltek, E-post den 25 Maj 2021.



Figur 16 Schematisk bild över installation av PV-system med solladdare i separat kraftstativ

#### 4.4 Kraftförsörjning av avbrottsfri kraft

Den avbrottsfria kraftens lasteffekt anges i detta fall i form av skenbar effekt, där den aktiva effekten beräknas med följande formel:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad [4.26]$$

Där S är skenbar effekt, P är aktiv effekt och  $\cos \varphi$  är effektfaktorn.

Vid efterforskningar inom Sweco av Soran Tahir Lundberg<sup>2</sup>, tekniskt ansvarig lågspänning, kunde effektdata för teknikhus av storlekarna 6,5x2,92 m och 11,02x2,92 m tas fram. Effektdata för teknikhus av storlekarna 18x2,92 och 24,045x9,92 fanns inte tillgängliga vid tidpunkten för undersökningen.

##### 4.4.1 Teknikhus 6,5 m

För teknikhuset på 6,5 m från Scenario 1 varierar den skenbara effekten mellan 5 kVA och 8,125 kVA beroende på antalet växeldriv som matas. Effektfaktorn uppskattas till 0,8 vilket ger att den aktiva effekten [P], enligt Formel 4.26, blir:

$$5 \text{ kVa} * 0,8 = 4 \text{ kW} \quad [4.27]$$

$$8,125 \text{ kVa} * 0,8 = 6,5 \text{ kW} \quad [4.28]$$

<sup>2</sup> Soran Tahir Lundberg, tekniskt ansvarig lågspänning Sweco, E-post 23 Maj 2021.

Detta innebär en lasteffekt på 4–6,5 kW. Effekten från ett PV-system på denna typ av teknikhus varierar från 0,1008 kW till 0,4048 kW för hela takytan enligt Tabell 5 och Tabell 6. Bestämning av hur stor del av den avbrottsfria kraften som kan matas från PV-systemet görs då med följande beräkningar:

$$\frac{0,1008}{6,5} \approx 0,01551 \approx 1,6 \% \quad [4.29]$$

$$\frac{0,1008}{4} = 0,02520 \approx 2,5 \% \quad [4.30]$$

$$\frac{0,4048}{6,5} \approx 0,0622 = 6,2 \% \quad [4.31]$$

$$\frac{0,4048}{4} = 0,1012 \approx 10,1 \% \quad [4.32]$$

Detta betyder alltså att 1,6 % till 2,5 % av lasteffekten kan matas med PV-systemet vid lägst verkningsgrad på solpanelerna och 6,2 % till 10,1 % av lasteffekten kan matas av PV-systemet vid högst verkningsgrad på solpanelerna, se bilaga 1 för sammanställning av mer data.

#### 4.4.2 Teknikhus 11 m

För teknikhuset på 11 m från Scenario 2 varierar den skenbara effekten mellan 5 kVA och 10 kVA beroende på antalet växel driv som matas. Effektfaktorn uppskattas till 0,8 vilket ger att den aktiva effekten [P] blir:

$$5 \text{ kVa} * 0,8 = 4 \text{ kW} \quad [4.33]$$

$$10 \text{ kVa} * 0,8 = 8 \text{ kW} \quad [4.34]$$

Detta innebär en lasteffekt på 4–8 kW. Effekten från ett PV-system på denna typ av teknikhus varierar från 0,1814 kW till 0,7286 kW för hela takytan enligt Tabell 11 och Tabell 12. Detta innebär att bestämning av hur stor del av den avbrottsfria kraften som kan matas från PV-systemet görs med följande beräkningar:

$$\frac{0,1814}{8} \approx 0,02267 \approx 2,3 \% \quad [4.35]$$

$$\frac{0,1814}{4} = 0,04535 \approx 4,5 \% \quad [4.36]$$

$$\frac{0,7286}{8} \approx 0,09108 \approx 9,1 \% \quad [4.37]$$

$$\frac{0,7286}{4} = 0,18215 \approx 18,2 \% \quad [4.38]$$

Detta betyder alltså att 2,3 % till 4,5 % av lasteffekten kan matas med PV-systemet vid lägst verkningsgrad på solpanelerna och 9,1 % till 18,2 % av lasteffekten kan matas av PV-systemet vid högst verkningsgrad på solpanelerna, se bilaga 2 för sammanställning av mer data.

## 5 DISKUSSION

Det finns ett stort urval av beräkningsprogram för beräkning av solcellanläggningar, många av dessa kräver inköp av licens för användning. Beräkningarna som programmen utför är i grunden detsamma och med linkande precision, skillnaden utgörs av källor för grundläggande data och användartypsnitt. Programmet Solekonomi 1.0 valdes då detta finns fritt tillgängligt för allmänheten via en webbplats som administreras av Energiforsk AB. Energiforsk är ett icke vinstutdelande aktiebolag som ägs gemensamt av de stora aktörerna på energimarknaden, Energiföretagen Sverige, Svenska Kraftnät, Energigas Sverige och Swedegas. Detta gör att Solekonomi 1.0 ses som ett pålitligt program för arbetets ändamål. Programmet kommer dock med vissa begränsningar, bland annat att data för soltimmar endast finns att tillgå regionalt och inte för specifika adresser. Då exakt position av teknikhusen inte är kända så anses regionala data vara tillräcklig. Programmet är även begränsat till SMHI:s statistik över värden i Sverige vilket gör att programmet inte skulle fungera utanför landsgränserna, detta utgör dock inte heller något problem för arbetet.

Resultatet visar som väntat att ökad takyta med fler solcellsmoduler resulterar i ökad effekt från solcellsanläggningen, effekten ökar även med bättre verkningsgrad för solcellsmodulerna. Graferna visar en linjär ökning kopplat till takyta och utgående effekt där en dubblering av takytan resulterar i en dubblering av effekt ut från PV-systemet. Med grafer som illustration blir det även tydligt hur azimutvinkeln påverkar den enskilda effekten. Ett tydligt mönster uppstår där sydsida levererar högst effekt, nordsida lägst effekt och där effekten för öst- och västsida nästan är identisk. Det noteras även att effektsummering av syd- och nordsida resulterar i ett värde som är mycket nära värdet för effektsummeringen av väst- och östsida. Detta tyder på att azimutvinkeln vid installation av solceller på hela takytan har en begränsad påverkan på effekten. Anledningen till detta kan förklaras med att taklutningen endast är 10° vilket gör att solen kommer åt hela takytan under en längre tid på dygnet. Beräkningarna i arbetet skedde helt teoretiskt och hade för avsikt att undersöka den största möjliga effekten ett PV-system kan generera. Antagandet om att hela takytan kan täckas med solceller gör att den beräknade effekten troligtvis är högre än vid faktisk installation.

Vid beräkningarna användes en modularea på 1,7 m<sup>2</sup> eftersom majoriteten av solceller för kommersiellt bruk har denna area. Verkningsgraden för samtliga scenarier följer samma mönster eftersom den standardiserade verkningsgraden endast är beroende av solstrålningen vid STC, som är en konstant, samt märkeffekten för solcellsmodulen och dess area enligt formel 4.12.

Vid ett tidigt skede i arbetet kunde vi konstatera att en direktkoppling av solceller ej är lämplig till batterier eller rectiverter. Systemet kräver nämligen kompletterande utrustning i form av solladdare och tilläggsmoduler för att fungera på ett tillfredställande sätt. Detta betyder att viss ändring av rectiverter-systemet måste utföras. Förslagsvis sker installation enligt figur 15 eller Figur 16, beroende på om det finns plats för ytterligare komponenter i kraftstativet eller ej. Andra rimliga lösningar än de som föreslagits i avsnitt 4.3 har inte hittats och har därför inte kunnat undersökas i detta arbete.

Hur stor del av den avbrottsfria kraften som kan tillgodoses med ett PV-system, enligt frågeställning 3, är en viktig del i arbetet. Vid låga verkningsgrader på solpanelerna ser vi att det blir svårt att motivera en installation av solceller på teknikhusen då effekten blir relativt låg. Vid högre verkningsgrader på solpanelerna exempelvis vid verkningsgrader på 17,7 % till 23,5 % kan en installation av solceller bli mer relevant.

## 6 SLUTSATS

Slutsatser att dra från arbetet är att största uteffekt från ett PV-system nås vid en azimutvinkel på  $0^\circ$ , en azimutvinkel på  $90^\circ$  och  $-90^\circ$  genererar lägre effekt än vid azimut  $0^\circ$ . Effekten vid en azimutvinkel på  $180^\circ$  visar sig i sin tur vara lägre än effekten för azimut  $90^\circ$  och  $-90^\circ$ .

De viktigaste parametrarna vid beräkning av ett PV-systems uteffekt är installationsytan och solcellsmodulens verkningsgrad. Azimutvinkelns påverkan begränsas vid små takvinklar, detta gör att installation av solceller på takets nordsida är gångbart med en takvinkel på  $10^\circ$ .

Den potentiella effekten som ett PV-system kan generera, enligt frågeställning 1, varierar mellan 0,10 kW och 1,62 kW beroende på ovan nämnda parametrar. Då utgångspunkten för beräkningarna är att utreda den maximala effekten ett PV-system kan generera antogs det även att hela takytan kan täckas med solceller. Detta betyder att det finns risk för att det beräknade antalet moduler för varje scenario överstiger vad som är praktiskt möjligt att installera.

Inkoppling av ett PV-system till den befintliga utrustningen i teknikhusen, enligt frågeställning 2, är ej möjlig utan kompletterande utrustning. Det krävs tilläggsmoduler och solladdare för att få ett fungerande system, installationsförslag på detta visas schematiskt i Figur 15 och Figur 16.

Hur stor del av den avbrottsfria kraften som kan tillgodoses från ett PV-system, enligt frågeställning 3 beräknades till 1,6 %–10,1 % för Scenario 1 och 2,3 %–18,2 % för Scenario 2.

Vidare intressanta undersökningar att utföra är: taklutningens påverkan på uteffekten från solcellerna, utföra simuleringar för specifika adresser och azimutvinklar, undersöka optimala dimensioner av solpaneler för varje scenario, utvärdera installationsmöjligheten av PV-system till UPS-system och att utföra kostnadskalkyler för dessa lösningar.

## REFERENSER

Batterielektronik (u.å.) *UPS Teknologi*.

<http://www.batterielektronik.se/ups/ups-teknologi> [2021-04-16]

Einstein, A. (1905). Concerning a Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light. *Annalen der Physik*, Volume 322, (Issue 6), ss. 132-148.

Eltek (2016). *Rectiverter – This is how it works*.

<https://www.eltek.com/insights/rectiverter---this-is-how-it-works/> [2021-03-25]

Halbleiter (u.å.). *Fundamentals: Doping n- and p-semiconductors*.

<https://www.halbleiter.org/en/fundamentals/doping/#n-doping> [2021-06-18]

Hallswachs, W. (1888). About the influence of light on electrostatically charged bodies. *Annalen der physik*, Volume 269 (Issue 2), ss. 301-312.

Hart, D. (2010). *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill.

HemSol (2021). *Verkningsgrad för solceller*.

<https://hemsol.se/vanliga-fragor/verkningsgrad-solceller/> [2021-05-05]

Hertz, H. (1887) About the influence of ultraviolet light on the electrical discharge.

*Annalen der physik*, Volume 267 (Issue 8), ss. 545-1048.

Hertz, H. (1994). *Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)*. London: Routledge.

Lenard, P. & Wolf, M. (1889). Atomizing the body by the ultraviolet light. *Annalen der physik*. Volume 273 (Issue 7), ss. 443-456.

Lenard, P. (1902). About the photoelectric effect. *Annalen der physik*. Volume 313 (Issue 5), ss.149-198.

MikeRun (2020), CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Full-wave-bridge-rectifier.svg> [2021-04-07]

Physics (u.å.) *Photoelectric Effect*.

<https://physics.info/photoelectric/> [2021-06-05]

Solenergy (2018). Edmond becquerel: The man behind solar panels.

<https://solenergy.com.ph/solar-panel-philippines-edmond-becquerel/> [2021-03-15]

Sundaram, S., Benson, D., & T, Kumar Mallick (2016). *Solar Photovoltaic Technology Production, Potential Environmental Impacts and Implications for Governance*. Amsterdam: Elsevier science.

Svensson, C. (2010). *Laddning av batterier – en vetenskap för sig*. Kungälv: Christer Svensson

<https://tudor.se/wp-content/uploads/sites/13/2014/09/Laddning-av-batterier.pdf>

Trafikverket (2018). *Om Västlänken*.

<https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/vi-bygger-och-forbatttrar/Vastlanken---smidigare-pendling-och-effektivare-trafik/Om-Vastlanken/> [2021-03-25]

Trafikverket (2019). *Utbildningsmaterial: Övergripande beskrivning av framtidens signalsystem och dess möjligheter*. Borlänge: Trafikverket

[https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/70062/Ineko.Product.RelatedFiles/2019\\_189\\_overgripande\\_beskrivning\\_av\\_framtidens\\_signalsystem\\_och\\_dess\\_mojligheter.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/70062/Ineko.Product.RelatedFiles/2019_189_overgripande_beskrivning_av_framtidens_signalsystem_och_dess_mojligheter.pdf)

Thomson, J, J. (1899). On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures, *Philosophical Magazine Series 5*, Volume 48 (Issue 295), ss. 547-567

Widén, J. (2010). *Beräkningsmodell för ekonomisk optimering av soleanläggningar – Elforsk rapport 10:103*.

<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/21077/10-103-berakningsmodell-for-ekonomisk-optimering-av-soleanlaggningar.pdf>

Zureks (2006a), CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waveform\\_halfwave\\_rectifier.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waveform_halfwave_rectifier.png) [2021-04-03]

Zureks (2006b), CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waveform\\_fullwave\\_rectifier.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waveform_fullwave_rectifier.png) [2021-04-03]

# BILAGA 1 Effektdata för avbrottsfri kraft och PV-system – Scenario 1

Syd+Nord 6,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*	Väst+Öst 6,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*
	100	5,88	1,550755181		100	5,88	1,557780119
	150	8,82	2,325254654		150	8,82	2,335792062
	200	11,76	3,101510362		200	11,76	3,113804004
	250	14,71	3,876009835		250	14,71	3,891815947
	300	17,65	4,650509308		300	17,65	4,671584124
	350	20,59	5,435546189		350	20,59	5,449596066
	400	23,53	6,201264489		400	23,53	6,227608008

Syd+Nord 6kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*	Väst+Öst 6kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*
	100	5,88	1,679984779		100	5,88	1,687595129
	150	8,82	2,519025875		150	8,82	2,5304414
	200	11,76	3,359969559		200	11,76	3,373287671
	250	14,71	4,199010654		250	14,71	4,216133942
	300	17,65	5,03805175		300	17,65	5,060882801
	350	20,59	5,888508371		350	20,59	5,903729072
	400	23,53	6,71803653		400	23,53	6,746575342

Syd+Nord 5,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*	Väst+Öst 5,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*
	100	5,88	1,832710668		100	5,88	1,841012868
	150	8,82	2,748028227		150	8,82	2,760481528
	200	11,76	3,665421337		200	11,76	3,679950187
	250	14,71	4,580738896		250	14,71	4,599418846
	300	17,65	5,496056455		300	17,65	5,520963055
	350	20,59	6,423827314		350	20,59	6,440431714
	400	23,53	7,328767123		400	23,53	7,359900374

Syd+Nord 5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*	Väst+Öst 5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*
	100	5,88	2,015981735		100	5,88	2,025114155
	150	8,82	3,02283105		150	8,82	3,03652968
	200	11,76	4,03196347		200	11,76	4,047945205
	250	14,71	5,038812785		250	14,71	5,059360731
	300	17,65	6,0456621		300	17,65	6,073059361
	350	20,59	7,066210046		350	20,59	7,084474886
	400	23,53	8,061643836		400	23,53	8,095890411

Syd+Nord 4,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*	Väst+Öst 4,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*
	100	5,88	2,239979706		100	5,88	2,250126839
	150	8,82	3,358701167		150	8,82	3,373921867
	200	11,76	4,479959411		200	11,76	4,497716895
	250	14,71	5,598680873		250	14,71	5,621511923
	300	17,65	6,717402334		300	17,65	6,747843734
	350	20,59	7,851344495		350	20,59	7,871638762
	400	23,53	8,95738204		400	23,53	8,99543379

Syd+Nord 4kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*	Väst+Öst 4kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*
	100	5,88	2,519977169		100	5,88	2,531392694
	150	8,82	3,778538813		150	8,82	3,7956621
	200	11,76	5,039954338		200	11,76	5,059931507
	250	14,71	6,298515982		250	14,71	6,324200913
	300	17,65	7,557077626		300	17,65	7,591324201
	350	20,59	8,832762557		350	20,59	8,855593607
	400	23,53	10,07705479		400	23,53	10,11986301

\*Avbfri = avbrottsfri kraft

## BILAGA 2 Effektdata för avbrottsfri kraft och PV-system – Scenario 2

Syd+Nord 8kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*	Väst+Öst 8kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*
	100	5,88	2,267408676		100	5,88	2,27739726
	150	8,82	3,400399543		150	8,82	3,41609589
	200	11,76	4,534817352		200	11,76	4,55336758
	250	14,71	5,667808219		250	14,71	5,69206621
	300	17,65	6,802226027		300	17,65	6,83076484
	350	20,59	7,935216895		350	20,59	7,96946347
	400	23,53	9,069634703		400	23,53	9,1081621

Syd+Nord 7,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*	Väst+Öst 7,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*
	100	5,88	2,418569254		100	5,88	2,429223744
	150	8,82	3,627092846		150	8,82	3,643835616
	200	11,76	4,837138508		200	11,76	4,856925419
	250	14,71	6,0456621		250	14,71	6,071537291
	300	17,65	7,255707763		300	17,65	7,286149163
	350	20,59	8,464231355		350	20,59	8,500761035
	400	23,53	9,674277017		400	23,53	9,715372907

Syd+Nord 7kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*	Väst+Öst 7kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*
	100	5,88	2,591324201		100	5,88	2,602739726
	150	8,82	3,886170907		150	8,82	3,904109589
	200	11,76	5,182648402		200	11,76	5,203848663
	250	14,71	6,477495108		250	14,71	6,505218526
	300	17,65	7,773972603		300	17,65	7,806588389
	350	20,59	9,068819309		350	20,59	9,107958252
	400	23,53	10,3652968		400	23,53	10,40932811

Syd+Nord 6,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*	Väst+Öst 6,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*
	100	5,88	2,790656832		100	5,88	2,802950474
	150	8,82	4,18510713		150	8,82	4,204425711
	200	11,76	5,581313664		200	11,76	5,604144714
	250	14,71	6,975763962		250	14,71	7,005619951
	300	17,65	8,371970495		300	17,65	8,407095188
	350	20,59	9,766420794		350	20,59	9,808570425
	400	23,53	11,16262733		400	23,53	11,21004566

Syd+Nord 6kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*	Väst+Öst 6kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*
	100	5,88	3,023211568		100	5,88	3,03652968
	150	8,82	4,533866058		150	8,82	4,554794521
	200	11,76	6,046423135		200	11,76	6,071156773
	250	14,71	7,557077626		250	14,71	7,589421613
	300	17,65	9,069634703		300	17,65	9,107686454
	350	20,59	10,58028919		350	20,59	10,62595129
	400	23,53	12,09284627		400	23,53	12,14421613

Syd+Nord 5,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*	Väst+Öst 5,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*
	100	5,88	3,298048983		100	5,88	3,312577833
	150	8,82	4,946035699		150	8,82	4,96886675
	200	11,76	6,596097966		200	11,76	6,623080116
	250	14,71	8,244084682		250	14,71	8,279369033
	300	17,65	9,894146949		300	17,65	9,935657949
	350	20,59	11,54213367		350	20,59	11,59194687
	400	23,53	13,19219593		400	23,53	13,24823578

Syd+Nord 5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*	Väst+Öst 5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta(\%)$	% av Avbfri*
	100	5,88	3,627853881		100	5,88	3,643835616
	150	8,82	5,440639269		150	8,82	5,465753425
	200	11,76	7,255707763		200	11,76	7,285388128
	250	14,71	9,068493151		250	14,71	9,107305936
	300	17,65	10,88356164		300	17,65	10,92922374
	350	20,59	12,69634703		350	20,59	12,75114155
	400	23,53	14,51141553		400	23,53	14,57305936

Syd+Nord 4,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*	Väst+Öst 4,5kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*
	100	5,88	4,030948757		100	5,88	4,04870624
	150	8,82	6,045154744		150	8,82	6,073059361
	200	11,76	8,061897514		200	11,76	8,094875698
	250	14,71	10,0761035		250	14,71	10,11922882
	300	17,65	12,09284627		300	17,65	12,14358194
	350	20,59	14,10705226		350	20,59	14,16793506
	400	23,53	16,12379503		400	23,53	16,19228818

Syd+Nord 4kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*	Väst+Öst 4kW	Märkeffekt W(solceller)	$\eta$ (%)	% av Avbfri*
	100	5,88	4,534817352		100	5,88	4,554794521
	150	8,82	6,800799087		150	8,82	6,832191781
	200	11,76	9,069634703		200	11,76	9,10673516
	250	14,71	11,33561644		250	14,71	11,38413242
	300	17,65	13,60445205		300	17,65	13,66152968
	350	20,59	15,87043379		350	20,59	15,93892694
	400	23,53	18,13926941		400	23,53	18,2163242

\*Avbfri = avbrottsfri kraft



# HÖGSKOLAN I BORÅS

Besöksadress: Allégatan 1 · Postadress: 501 90 Borås · Tfn: 033-435 40 00 · E-post: [registrator@hb.se](mailto:registrator@hb.se) · Webb: [www.hb.se](http://www.hb.se)