

6. November 2023

Ich konfiguriere und baue mir meine eigene PV-Anlage aufs Dach

Eines vorweg: Ich übernehme keinerlei Garantien für meine nachfolgenden Ausführungen über Photovoltaik-Anlagen, im Weiteren abgekürzt als PV. Das soll nicht heißen, dass ich möglicherweise Mist geschrieben habe und dafür keine Verantwortung übernehmen will. Ich habe ganz sicher keinen Mist geschrieben. Aber Gesetze und Verordnungen können sich jederzeit ändern. Zum Beispiel habe ich erst kürzlich zum ersten Mal im Leben gehört, dass ein einzelnes PV-Element eine maximale Fläche von 2 m² haben darf. Wenn ich selbst diese Anforderung hätte einhalten müssen (anstatt der Hersteller), dann wäre ich möglicherweise in eine Falle getappt.

Ich weiß auch nicht, ob und wie lange es noch erlaubt ist, sich seine PV-Anlage selbst aufs Dach zu montieren. Wo man doch heutzutage für jeden Handgriff ein abgeschlossenes Studium, einen Meisterbrief, einen Gesellenbrief oder zumindest einen Sachkundenachweis braucht. Zum Beispiel braucht man für das "Führen" einer Motorsäge einen Motorsägeführerschein.

Ich habe zwei Photovoltaikanlagen selbst zusammengestellt und aufs Dach gebaut. Die erste Anlage mit 6KWp (das kleine p steht für Peak, also den Spitzenwert, wenn die Sonne hell erstrahlt) auf mein eigenes Dach im Jahr 2011 und die zweite Anlage mit 19,5 KWp auf das Dach meiner Tochter im Jahr 2022. Die erste Anlage habe ich ganz alleine gebaut und bei der zweiten Anlage hat mir ein Cousin vier Tage assistiert. Das nachfolgende Dokument beschreibt wie ich die zweite Anlage geplant und gebaut habe. Sie ist jedenfalls genauso in Betrieb gegangen, was beweist, dass ich zumindest keine offensichtlichen Fehler gemacht habe.

Die Sonne schickt keine Rechnung. Ha, ha. Wenn man eine PV-Anlage nicht selbst baut, dann wird sie so teuer, dass sie sich möglicherweise nach 20 Jahren gerade mal soeben amortisiert. Ich rechne jetzt mal mit einer großen Anlage (20 KWp) und einem mittelhohen PV-Selbstverbrauch von 2000 KWh pro Jahr, mal 20 Jahre mal 40 Cent. Dann hat die Anlage nach 20 Jahren ca. 16000 € an Eigenverbrauch eingespielt. Nehmen wir weiterhin an, dass sie 15000 KWh pro Jahr einspeist mit 8 Cent Vergütung pro KWh. Dann kommen weitere 24000 € hinzu. Macht zusammen 40000.- € Ersparnis plus Einnahmen nach 20 Jahren. Ich habe mir gerade eben (siehe Ausgabedatum dieses Dokuments) im Internet eine große Anlage bei einer Solarfirma konfiguriert. Das Angebot belief sich auf 31000.- €. Man hat also nach 20 Jahren 9000.- € Gewinn gemacht. Aber nur nach Milchmädchenrechnung. Wenn man nämlich berücksichtigt, dass man heutzutage für Festgeld wieder ca. 4% Zinsen bekommt, dann kann man 31000.-

Startkapital, 20 Jahre Laufzeit und 4% Zinsen in einen Zinseszinsrechner im Internet eingeben. Nach dem Ende der Laufzeit werden dann aus 31000.- € ca. 68000.- €. Das riecht nun nicht mehr nach einem Gewinn durch die PV-Anlage. Nicht selbst gebaute PV-Anlagen sind eher Liebhaberei als Gewinnmaschinen.

Die PV-Anlage auf dem Hausdach meiner Tochter mit 19,5 KWp hat mich ca. 13000.- € an Materialkosten plus 750.- € für den Elektriker gekostet. Diese Anlage amortisiert sich ganz sicher irgendwann, obwohl das Haus die denkbar schlechteste Ausrichtung zur Sonne mit nur 70% Wirkungsgrad hat (die Firstpfette des Satteldachs geht von Norden nach Süden; optimal für eine PV-Anlage ist eine Ost-West Ausrichtung der Firstpfette).

Der Teil 1 des nachfolgenden Dokuments ist der allgemeine Teil, in dem ich beschreibe, wie man eine PV-Anlage plant und baut.

Der Teil 2 enthält die konkrete Planung der PV-Anlage meiner Tochter. Diese Anlage wurde genauso gebaut und ist seit etwas mehr als einem Jahr in Betrieb. Vielleicht habe ich es mit der Planung etwas übertrieben (zu viele Gedanken und zu viele Worte). Aber schließlich bin ich ja kein Profi und meine letzte Anlagenplanung liegt 11 Jahre zurück. Die Kleinteiligkeit des zweiten Teils ist daher meinem kleinen und etwas veralteten Wissen geschuldet. Ich wollte halt nichts falsch machen und habe daher mehr nachgedacht und mehr geschrieben als nötig war.

Es ist gut möglich, dass sich einige Ausführungen des ersten Teils im zweiten Teil wiederholen. Der zweite Teil war halt schon lange fertig bevor der erste Teil geschrieben wurde.

Die im Teil 2 eingebauten Hyperlinks haben zum Zeitpunkt der Anlagenbestellung (März 2022) alle funktioniert. Nach und nach werden aber immer mehr dieser Links im Nirwana landen bis irgendwann keiner davon mehr ins Ziel führt. Das sollte aber kein Problem sein, weil man bei der Eingabe eines Suchbegriffs in Google (z.B. Dachhaken) sofort aktuelle Beschreibungs- und Kauflinks bekommt.

Inhalt

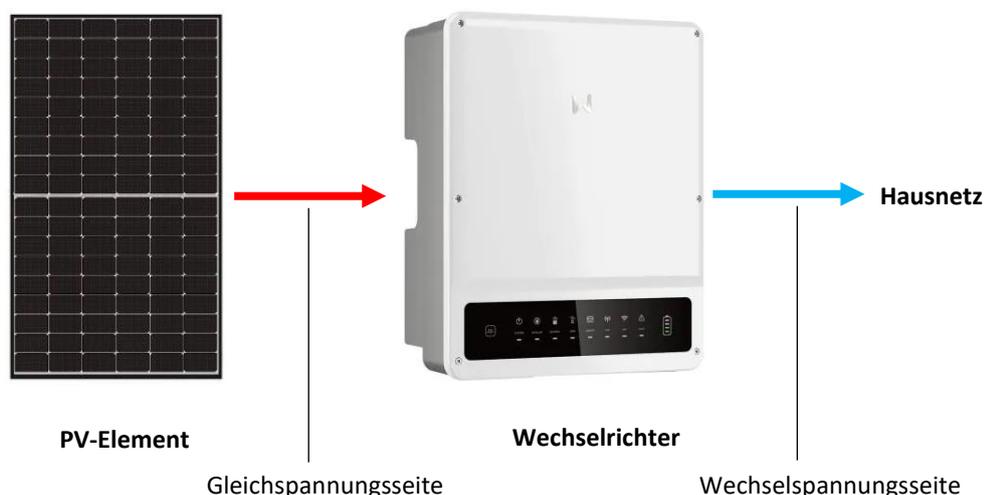
1. Die Größe der PV-Anlage: Klein, mittel oder groß?	5
1.1 Hausdach ausmessen oder einen alternativen Einbauort festlegen .5	
1.2 Die Größe der Anlage festlegen.....	6
2. Der Anschluss der PV-Anlage an den Haushalt	8
3. Die Komponentenauswahl der PV-Anlage	9
3.1 PV-Elemente	10
3.2 Wechselrichter	11
3.3 Die Unterkonstruktion (Dachhaken und Aluschiene)	12
3.4 Die Bestellliste (mit Kleinkram)	15
4. Die Montage der PV-Anlage	16
4.1 Gerüst stellen.....	16
4.2 Die Unterkonstruktion (Dachhaken und Aluschiene)	17
4.3 Erdung der Profilschiene.....	19
4.4 Die PV-Elemente montieren.....	20
4.5 Die PV-Elemente verkabeln	23
5. Die PV-Anlage meiner Tochter	26

Teil 1

Eine PV-Anlage selbst zusammenzustellen und aufzubauen ist keine Hexerei. Hinterher wird mir jeder zustimmen. Davor sieht es logischerweise etwas anders aus. Die Ehrfurcht überwiegt. Das war bei mir nicht anders. Was ist denn, ganz grob zusammengefasst, überhaupt zu tun:

- Einbauort festlegen.
- Elektriker suchen, der später die Wechselspannungsseite anschließt.
- Die Position der Hauseinführung festlegen (die Position, wo die Gleichspannungskabel durch die Hauswand ins Haus eingeführt werden).
- Größe der Anlage festlegen.
- Einzelkomponenten festlegen.
- Einzelteile der Anlage bestellen. Ich habe nachgezählt. Bei meiner Tochter waren es acht verschiedene Lieferanten. Drei große Brocken (a. PV-Elemente, b. Wechselrichter und c. Aluminium Trageschienen) und den Kleinkram bei den übrigen fünf Lieferanten.
- Gerüst beschaffen und aufstellen.
- Anlage aufs Dach bauen und verkabeln bis die drei Gleichspannungs-Strings (der Begriff hat sich eingebürgert, niemand sagt Stränge) vor dem an die Wand geschraubten Wechselrichter baumeln.
- Elektriker mit der Lizenz zum Unterschreiben bestellen.

Aus welchen Komponenten besteht überhaupt eine PV-Anlage? Hier ein Prinzipschaltbild:



1. Die Größe der PV-Anlage: Klein, mittel oder groß?

1.1 Hausdach ausmessen oder einen alternativen Einbauort festlegen

Ich habe beide Anlagen auf ein Satteldach mit ca. 33° Dachneigung gebaut. Diese Dachschräge ist für Normalbürger (also Nicht-Bergsteiger) noch einigermaßen begehbar. Es ist aber immerhin so rutschig, dass man unbedingt die unterste Reihe der Aluminium Trägerschienen zuerst setzen muss und sich dann auf jeder Dachseite nach oben arbeitet (2., 3., 4, 5. und 6. Reihe der Trägerschienen). Natürlich ist die Anzahl der Trägerschienenreihen abhängig von der Größe der Anlage. Man braucht immer zwei Aluschiene pro Reihe an PV-Elementen (3 PV-Reihen → 6 Reihen mit Aluschiene). Nach der Montage der Aluschiene kann man sich auf dem Dach ganz erheblich sicherer bewegen. Man kann sich z.B. aufs Dach setzen und mit den Füßen an den Aluschiene abstützen. Oder man setzt sich direkt mit dem Hintern auf eine Aluschiene.

Man wird wohl nicht umhinkommen, ein einziges Mal aufs Dach zu steigen, bevor man ein Gerüst vor dem Dach stehen hat. Das Dach muss absolut trocken und die Schuhe rutschfest sein. Wer es kann, kann einzelne Ziegel ca. 10cm hochschieben und sich dann auf die dann freiliegenden Dachlatten und Dachsparren treten, um einen besseren Halt zu haben. Für mich selbst ist diese Ziegelhochschieberei immer eine Quälerei. Ich gehöre zu denen, die es nicht gut können.

Dach ausmessen:

Breite und Höhe des Dachs sowie die Positionen von Dachfenstern, Entlüftungsziegel und sonstigen Hindernissen notieren und den Zettel gut aufbewahren, damit er nicht verloren geht.

Hier noch ein paar Anmerkungen. Wenn man ein Walmdach hat, dann passen da natürlich weniger PV-Elemente drauf. Wenn es nicht gerade ein großes Walmdach ist, kann man überlegen, ob man nicht auf die dritte Reihe von unten verzichtet, weil da nicht mehr viele Elemente hinpassen.

Wenn ich ein Dach mit einer Neigung von über 50° hätte (wie es früher, also an alten Häusern üblich war), dann würde ich mich weigern, mehr als eine Reihe an PV-Elementen, nämlich ganz unten an der Dachrinne, zu montieren. Zu viel Angst (aber zumindest nicht ganz geheuer).

Wenn man gar kein Dach besitzt, aber Platz für eine PV-Anlage im Garten hat, dann muss man sich eine Unterkonstruktion für die PV-Elemente überlegen. Ich würde mir vier Löcher ausheben (Spatenbreite x Spatenbreite x 70cm), vier T-Stahl-Träger 70x70x8mmx150cm Länge einbetonieren, vier gehobelte und geschlitzte Holzpfosten (100x100x2500mm) am T-Stahl festschrauben und

auf den Holzpfosten eine Sparrenkonstruktion aufbringen (Querschnitt b x h = 80x120mm).

Sehr wahrscheinlich bräuchte man für eine solche Konstruktion eine statische Berechnung von einem amtlich zugelassenen Statiker. 70cm Tiefe würden wegen der offiziell ausgewiesenen Frosttiefe nicht genügen, 120mm Sparrenhöhe würde voraussichtlich ebenfalls nicht genügen.

1.2 Die Größe der Anlage festlegen

Was spricht für ein Balkonkraftwerk:

Sogenannte Balkonkraftwerke sind momentan groß in Mode. Und ich gebe zu, dass die Idee bestechend ist. Die Idee hinter den Balkonkraftwerken lautet wie folgt:

Man baue eine kleine Anlage auf seinen Balkon. Mittlerweile sind, glaube ich, 800 Watt erlaubt. Diese 800 Watt decken den Grundbedarf des Haushalts. Rechnen wir diese 0,8 KW mal auf ein Jahr hoch, wenn die Sonne Tag und Nacht scheinen würde. $24h * 365 * 0,8KW = 7008KWh$. Oder etwas realistischer (10 Stunden Sonnenschein an 100 Tagen): $10h * 100 * 0,8KW = 800KWh$. Das klingt doch immer noch gut und könnte sich schon nach wenigen Jahren amortisieren

Jetzt kommt aber das Aber. Die Balkonanlage ist nur einphasig, aber z.B. der Herd und der Backofen sind dreiphasig. Außerdem brauchen sie, wie alle anderen Großverbraucher (Spülmaschine, Waschmaschine, Wäschetrockner), mehr Strom als die Balkonanlage liefern kann. Nächste Idee: Kühl- oder Gefrierschrank. Irgendwann geht aber die Sonne unter. Dann muss der Strom woanders herkommen. Es wird ein einphasiger, konstanter Stromverbraucher gesucht, der nahe an die 800 Watt herankommt, sich aber nicht beklagt, wenn der Strom mal für 15 Stunden bis 3 Tage weg ist. Schwierig bis unmöglich. Selbst das bloße Herausfinden der am besten geeigneten Phase dürfte nicht ganz trivial sein. Sogar, wenn man ein Oszilloskop zur Hand hat, um alle Steckdosen des Haushalts auszumessen (L1, L2, L3) und in eine Excel Tabelle einzutragen.

Anmerkung zum Thema Einspeise-Steckdose:

Dieser Begriff klingt wie eine vorkonfigurierte Lösung, über die man ein Balkonkraftwerk mit seiner Hausinstallation verbindet und darüber das obige Problem (die Suche nach dem idealen, einphasigen Verbraucher) löst bzw. gar nicht erst entstehen lässt. Leider stimmt das nicht. Es ist sicherheitstechnisch vorgeschrieben, dass man den Wechselrichter eines Balkonkraftwerks an eine Einspeisesteckdose anschließen muss. Dadurch

wird das Problem aber nur ein paar Zentimeter nach hinten verschoben. Der Wechselrichter wird in die Einspeise-Steckdose gesteckt. Das ist sozusagen die Eingangsseite. Die Ausgangsseite der Einspeise-Steckdose ist schlicht und einfach ein dreiadriges Kabel (Leiter, Nullleiter, Erde), das irgendwie mit dem Hausnetz verbunden werden muss. Abgesehen von einer Billiglösung (Verklebung der Einspeise-Steckdose mit einer normalen Steckdose in räumlicher Nähe), die möglicherweise verboten ist, sehe ich keine andere Lösung als die Ausgangsseite der Einspeise-Steckdose in den Zählerschrank zu führen. Genau wie bei einer PV-Anlage auf dem Dach.

Ein Balkonkraftwerk käme für mich nur in Betracht, wenn es keine andere Möglichkeit (Einbauort) gibt.

Was spricht für eine kleine Anlage:

Nach meiner ganz persönlichen Meinung macht eine einphasige Anlage keinen Sinn. **Sie muss dreiphasig sein** und zentral einspeisen, damit der ganze Haushalt mithelfen kann, den Eigenverbrauch hochzutreiben. Man kann die Größe einer kleinen Anlage von der Dachfläche abhängig machen. Eine PV-Anlage auf nur einer Dachhälfte ist etwas einfacher zu bauen als eine Anlage auf beiden Dachhälften. Und wenn man auf jeder Außenseite des Dachs ca. einen Meter Platz lässt (also kein PV-Element montiert), dann spart das schon etwas Angst bei der Montage, falls man auf den Giebelseiten kein Gerüst hat.

Was spricht für eine mittelgroße Anlage:

Eine mittelgroße Anlage ist ein guter Kompromiss. Man könnte die Größe der Anlage zum Beispiel von einem besonders günstigen Wechselrichter abhängig machen und die Anzahl der PV-Elemente an die Leistung des ausgesuchten Wechselrichters anpassen.

Was spricht für eine große Anlage:

Der Besitz eines Elektroautos. Ohne Sondergenehmigung (zumindest in BW ist das so) darf man sein E-Auto nur mit maximal 11 KW Leistung laden. Und da man auch bei mittelgutem Wetter gerne die 11 KW seiner PV-Anlage entnehmen würde, ist man mit ca. 20 KWp gut dafür gerüstet, dass auch bei mittelgutem Wetter die 11 KW von der PV-Anlage kommen. Natürlich muss die nötige Dachfläche dafür zur Verfügung stehen.

Was spricht für eine Speicherbatterie:

Eine Speicherbatterie als Bestandteil der PV-Anlage drängt sich bei genauer Abwägung der Fakten und Preise nicht unbedingt sofort auf. Ein modernes Haus mit einer Wärmepumpe hat auch einen nennenswerten Stromverbrauch (z.B. 7 KWh) über Nacht. Da kommt man nach kurzer Recherche zu einer Batteriegröße

von 10 KWh und die kostet ganz grob 10000.- €. Ich schieße jetzt mal aus der Hüfte und schätze ganz grob, dass der im Beispiel genannte Überschuss von 7 KWh an 150 Tagen im Jahr gegeben ist ($150 * 7\text{KWh} = 1050\text{KWh}$ pro Jahr). Bei einem Strompreis von 40 Cent/KWh muss die Batterie 25000 KWh speichern und abgeben, bis sich die Investition amortisiert hat. $25000\text{KWh} / 1050\text{KWhpa}$ (pa = per anno = pro Jahr) = 23,8 Jahre. Bei einer geschätzten Lebensdauer der Batterie von 10 Jahren kann sich diese Anschaffung niemals rechnen.

Fazit: Wir brauchen eine andere Speichertechnologie.

Die Größe der Anlage muss jeder für sich selbst entscheiden. Genauso die Frage, ob mit oder ohne Batterie. Die Verwendung eines Hybridwechselrichters (an den kann man eine Speicherbatterie anschließen, dafür kostet er, ganz grob, einen Tausender mehr) erlaubt die spätere Nachrüstung einer Batterie.

Autobatterien als Solarspeicher?

Ich bin ein großer Fan von Autobatterien. Sie sind sehr robust, vertragen einen großen Ladebereich (12V bis ca. 16V), viele Ladezyklen und vor allem sind sie billig. Ganz grob bekommt man 1 KWh für 100 €. Das sind ca. 10% der Kosten für PV-Batterien. Ich habe mir in vielen Versuchen im Internet die Augen nach PV-Wechselrichtern wurd gesucht, an die man Autobatterien anschließen kann. Leider ohne Erfolg. Ja, es gibt sie tatsächlich, aber ausnahmslos alle Treffer waren Wechselrichter für Wohnmobile oder andere Inselanlagen (sie erzeugen 230V Wechselspannung, die aber nicht an ein Netz angeschlossen werden können bzw. dürfen).

2. Der Anschluss der PV-Anlage an den Haushalt

Die Gleichspannungsseite der PV-Anlage, also die PV-Elemente, muss man selbst verkabeln. Das ist aber nicht besonders schwierig und ist in einem nachfolgenden Kapitel präzise beschrieben. Der Job des PV-Anlagen-Selbstbauers endet vor dem Wechselrichter in Form von sechs Kabeln (Plus und Minus von drei PV-Strings), die vor dem Wechselrichter baumeln und lang genug sein müssen, um sie auf die Gleichspannungseingänge des Wechselrichters aufzustecken. Diese Aufgabe ($6 \times 5 \text{ Sekunden} = 30 \text{ Sekunden}$) übernimmt aber der Installateur, wenn die Wechselspannungsseite der PV-Anlage fertig verkabelt ist und die Anlage in Betrieb genommen wird.

Der Anschluss der Wechselspannungsseite des PV-Wechselrichters, also der Ausgangsseite des Wechselrichters, muss von einem registrierten Elektro-Installationsmeister gemacht werden. Der Meister muss unterschreiben und

somit die Verantwortung tragen. Ausführen darf die Arbeit jemand, dem er vertraut.

Ich habe bei mir in der Region per Herumfragen gefunden, der unterschreiben darf und ein Geselle von ihm hat die Arbeiten ausgeführt. Der Geselle bekam 250.- € und der Meister 500.- € für das Tragen der Verantwortung. Meine Tochter wohnt 100 km entfernt von mir in BW. Sie hat einen Unterschriftsberechtigten per MyHammer.de gefunden und etwas mehr bezahlt als ich (es war ja auch 11 Jahre später). Die Chancen, einen unterschriftsberechtigten Elektro-Installateur zu finden, sind gut. Eine Menge von Zimmereien und Dachdeckerbetrieben haben sich auf die Montage von PV-Anlagen spezialisiert oder diversifiziert. Die brauchen alle ebenfalls einen Elektriker für die Unterschrift. Nur die allerwenigsten sind so groß, dass sie einen eigenen, unterschriftsberechtigten Elektriker eingestellt haben. Es bleiben daher eine Menge an unterschriftsberechtigten Elektrikern übrig, die ein kleines Zusatzgeschäft gerne mitnehmen.

Die Hauseinführung:

Noch ein paar Worte zur Hauseinführung. Irgendwo müssen die sechs Kabel ins Haus. Die gute Nachricht: Es gibt für alles eine Lösung. An meinem Haus habe ich die sechs Kabel an der Straßenseite an meinem Vorbau aus Holz über der Haustür, aber **außerhalb** des Hauses, durchs Dach durchgeführt. Danach an den senkrechten (Träger des Vordachs) und waagerechten Holzpfosten (neu eingezogen, gleiche Optik wie das vorhandene Holz) entlanggeführt. Danach noch ein Stück senkrecht an der Außenwand des Hauses entlang (Holzrähmchen ausgehöhlt; Farbe wie das übrige Holz) bis zur Bohrstelle. Danach habe ich 3 Löcher nebeneinander an der Außenwand nach innen gebohrt (Ich glaube 3x16mm). Die Kabelführung meiner PV-Kabel ist nur für erfahrenen Kriminalisten sichtbar. Bei meiner Tochter habe ich schon im Rohbau die Kabel vom erwarteten Einbauort des Wechselrichters zur Übergabestelle der Kabel auf dem Dach geführt. Aber auch ohne diese Vorkehrungen hätte ich die Kabel nahezu unsichtbar in den Keller gebracht. Es gibt für fast alles eine Lösung.

3. Die Komponentenauswahl der PV-Anlage

Die drei ersten Unterkapitel sind den drei wichtigsten Komponenten gewidmet. Im vierten Unterkapitel kommt der Kleinkram. Die drei wichtigsten Komponenten sind dort aber der Vollständigkeit halber ebenfalls noch einmal aufgeführt.

3.1 PV-Elemente

Die PV-Elemente und der Wechselrichter müssen zusammenpassen. Heutzutage hat man aber so viel Auswahl bzw. Kompatibilität, dass man die beiden wichtigsten Komponenten nahezu unabhängig voneinander auswählen kann und hinterher noch einmal kontrolliert, ob es eine Unverträglichkeit gibt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es keine gibt, ist hoch.

Ich wähle die PV-Elemente nach dem besten Preis-Leistungsverhältnis aus. Wo bekomme ich am meisten Watt pro Euro? Gerade eben (siehe Ausgabedatum) gab es das 405 Watt Modul von JA-Solar im [Photovoltaikshop](#) für 102.- € pro Stück. Das ist geradezu unglaublich billig.

Jeder Anbieter von PV-Komponenten bietet auch den Download der Datenblätter an. Hier ein Beispiel:

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC						
TYPE	JAM54S30 -390/MR	JAM54S30 -395/MR	JAM54S30 -400/MR	JAM54S30 -405/MR	JAM54S30 -410/MR	JAM54S30 -415/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	390	395	400	405	410	415
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	36.85	36.98	37.07	37.23	37.32	37.45
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	30.64	30.84	31.01	31.21	31.45	31.61
Short Circuit Current(Isc) [A]	13.61	13.70	13.79	13.87	13.95	14.02
Maximum Power Current(Imp) [A]	12.73	12.81	12.90	12.98	13.04	13.13
Module Efficiency [%]	20.0	20.2	20.5	20.7	21.0	21.3
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α_{Isc})	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β_{Voc})	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ_{Pmp})	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Die obige Bildschirmkopie eines Datenblatts der Fa. JA-Solar gilt für sechs verschiedene, aber ähnliche PV-Module. Ich hatte für meine Tochter das 405-er Modul (3. Spalte von rechts) bestellt. Dieser Spalte entnehme ich eine Leerlaufspannung (Open Circuit Voltage) von 37,23 Volt. Alle PV-Wechselrichter vertragen eine Eingangsspannung von ca. 1000 V (Volt). Genauer braucht man den Wert erst für die finale Kontrolle. $1000V / 37,23V = 26,86$. Abgerundet darf man also 26 PV-Elemente in Reihe schalten und an einen einzigen Gleichspannungseingang des PV-Wechselrichters hängen. Falls man eine Riesenanlage mit mehr als 26 Elementen pro String bauen möchte, dann muss man eine Anfrage beim Hersteller starten. 27 sind mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit möglich und bis zu 32 Module sind denkbar (1000V / 31,21V Maximum Power Voltage). Mit 26 Modulen pro String käme man schon auf $3 * 26 * 405W = 31,59KW$. Diese Anlagengröße wird wohl kaum ein Selbstbauer brauchen.

3.2 Wechselrichter

Nach meiner Meinung muss ein Wechselrichter dreiphasig sein. Außerdem muss er die DC-Eingangsspannung (DC = Gleichspannung) des PV-Strings aushalten. Alle Wechselrichter, die ich bisher gesehen habe, vertragen ziemlich genau 1000V. Auch hier nehme ich logischerweise den preiswertesten, der die geforderte Leistung kann. Ich habe mir gerade eben (siehe Ausgabedatum) den erstbesten Wechselrichter mit 20 KW Leistung herausgesucht. Bei Wechselrichtern wird die Leistung typischerweise (oder gar immer?) in VA anstatt Watt angegeben (Volt Ampere = Watt). Der Grund ist (wahrscheinlich), dass die Wechselrichter auch noch den Cosinus Phi regeln können müssen (bitte selbst im Internet nachschlagen). Daher ist die Wirkleistung (Watt) meistens bis zu 10% kleiner als die Scheinleistung (Volt Ampere). Ich habe aber auch schon Datenblätter gesehen, wo die beiden Werte übereingestimmt haben. Die Wirkleistung entscheidet und die steht im Datenblatt. Nehmen wir mal an, dass ich mich für drei Strings à 11 PV-Module mit einer Leistung von 405 Watt pro Module entschieden hätte. Dann wähle ich den Wechselrichter wie folgt aus:

$$3 * 11 * 405 \text{ Watt} = 13365 \text{ Watt Wirkleistung}$$

91% Wirkungsgrad der Sonne wegen der Hausausrichtung

$$13365 \text{ Watt} * 0,91 = 12162 \text{ Watt Wirkleistung}$$

→ Wahl der Wechselrichter Wirkleistung: **12 KW** oder der mit der nächstgrößeren Wirkleistung

Die Wechselrichter besitzen eine sehr ausgeklügelte und umfangreiche Schutzschaltung. Er geht nicht kaputt, wenn mal 12,5 KW Wirkleistung ankommen. Er schützt sich selbst. An den drei sonnenreichsten Tagen des Jahres würde daher nur 12 KW Leistung anstatt 12,162 KW ins Haus eingespeist. Das ist kein Beinbruch. Allerdings ist der nächstgrößere Wechselrichter auch nicht viel teurer. Geld sparen kann man durch den Kauf des kleineren also kaum. Aber man kann Nerv-E-mails des lokalen Stromanbieters vermeiden. Ich habe 3 Jahre nacheinander solche E-mails bekommen: „Uns ist aufgefallen (einer Software, die permanent Daten prüft), dass Ihr Wechselrichter inkompatibel mit Ihrer Anlage ist“. Ich habe einen 8 KW Wechselrichter an einer 6 KWp Anlage. Aus dem einfachen Grund, weil es damals keinen kleineren dreiphasigen Wechselrichter dieses Herstellers gab. Ist eigentlich einleuchtend. Ich habe das in deren Datenbank eingetragen. Ohne Erfolg. Im Jahr darauf noch einmal das Gleiche. Im dritten Jahr habe ich dann eine falsche Leistung des Wechselrichters eingetragen und danach war Ruhe. Das soll aber kein Argument für den kleineren Wechselrichter sein. Wenn ein solches Tracking-E-Mail eines Tages kommt: Wert eintragen, der künftige, gleichartige E-mails verhindert.

Noch ein paar Ausführungen zum Wirkungsgrad (im obigen Beispiel mit 91% angegeben). Abhängig von der Dach-/Giebel-Ausrichtung des Hauses bekommt das Haus nicht die maximal mögliche Sonnenmenge ab, sondern weniger. Den Wert für das eigene Haus findet man in Tabellen oder Rechenseiten im Internet. Man muss nur den richtigen Suchbegriff eingeben. Ein möglicher Suchbegriff ist zum Beispiel: „PV-Ausbeute Hausausrichtung“. Es gibt wahrscheinlich noch wesentlich bessere Suchbegriffe. Ich habe über diesen Suchbegriff die folgende Webseite gefunden:

<https://www.rechnerphotovoltaik.de/photovoltaik/voraussetzungen/dachausrichtung#>

Und in diesem Link findet sich die folgende Tabelle:

		Dachausrichtung																	
		Süd		Südost Südwest						Ost West		Nordost Nordwest						Nord	
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Dachneigung	0°	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%
	10°	93%	93%	93%	92%	92%	91%	90%	89%	88%	86%	85%	84%	83%	81%	81%	80%	79%	79%
	20°	97%	97%	97%	96%	95%	93%	91%	89%	87%	85%	82%	80%	77%	75%	73%	71%	70%	70%
	30°	100%	99%	99%	97%	96%	94%	91%	88%	85%	82%	79%	75%	72%	69%	66%	64%	62%	61%
	40°	100%	99%	99%	97%	95%	93%	90%	86%	83%	79%	75%	71%	67%	63%	59%	56%	54%	52%
	50°	98%	97%	96%	95%	93%	90%	87%	83%	79%	75%	70%	66%	61%	56%	52%	48%	45%	44%
	60°	94%	93%	92%	91%	88%	85%	82%	78%	74%	70%	65%	60%	55%	50%	46%	41%	38%	36%
	70°	88%	87%	86%	85%	82%	79%	76%	72%	68%	63%	58%	54%	49%	44%	39%	35%	32%	29%
	80°	80%	79%	78%	77%	75%	72%	68%	65%	61%	56%	51%	47%	42%	37%	33%	29%	26%	24%
	90°	69%	69%	69%	67%	65%	63%	60%	56%	53%	48%	44%	40%	35%	31%	27%	24%	21%	19%

Um das Ergebnis noch etwas genauer zu bekommen muss man interpolieren oder einen passenden „Hausausrichtungs-Rechner“ finden.

Anschließend suche ich mir im Photovoltaikshop einen passenden, preiswerten, dreiphasigen Wechselrichter.

3.3 Die Unterkonstruktion (Dachhaken und Aluschiene)

Die Unterkonstruktion besteht aus Dachhaken und PV-Modul-Trageschienen aus Aluminium. Die Dachhaken werden auf die Dachsparren geschraubt, die Aluschiene werden auf die Dachhaken geschraubt und die PV-Module werden auf die Aluschiene geschraubt.

Dachhaken → Aluschiene → PV-Module

Ich berechne jetzt mal exemplarisch den Materialbedarf für eine mittelgroße PV-Anlage, die auf nur einer Dachhälfte angebracht wird.

Annahmen:

3 Reihen mit PV-Elementen → 6 Reihen mit Dachhaken/Aluschiene

Ein Dachhaken auf jedem der 17 Sparren

Dachgröße 10m breit x 6m hoch

Berechnung des Materialbedarfs:

Dachhaken: 17 Sparren x 6 Reihen = 102 Dachhaken

Aluschiene: 10m Dachbreite x 6 Reihen = 60m

Anmerkungen:

- Laut Expertenmeinung genügt es, wenn man einen Dachhaken auf die beiden äußersten (rechts und links) Sparren setzt, dazwischen auf nur jedem zweiten Sparren. Dadurch kann man mindestens ein Drittel Haken einsparen.
- Die Aluschiene kann man mit entsprechenden Verbindern ohne Verlust an Stabilität gut zusammensetzen. Das Zusammensetzen von 20cm Stücken macht vermutlich keinen Sinn, aber bei 1m langen Stücken schon. Man braucht daher keinen großen Überhang an Schienen bei der Bestellung, evtl. fast gar keinen.
- Die Aluschiene gibt es in verschiedenen Längen, z.B. 5m und 6m. Falls es beim Meterpreis einen nennenswerten Unterschied gibt, kauft man die preiswerteren.

Ich habe für beide von mir gebauten PV-Anlagen die Aluschiene Solo von der Fa. Schletter gekauft. Im Jahr 2011 habe ich sie am PC ausgesucht. Da ich damals sehr zufrieden war (Preis-/Leistungsverhältnis), habe ich sie für meine Tochter wieder genommen. Es gibt mindestens drei oder vier Konkurrenzprodukte, die wahrscheinlich ebenso gut sind.

Bei den Dachhaken habe ich ebenfalls die absolute Standardausführung (also billig) aus Edelstahl genommen (weniger als 5.- € pro Stück), die aber qualitativ einen tadellos guten Eindruck machen. Manche Dachhaken kosten bis zu 30.- € pro Stück. Da kann man schnell arm werden (siehe oben: 102 Stück).

Anmerkungen zu den Dachhaken:



Die Bodenplatte des Dachhakens wird auf dem Sparren mit Holzschrauben festgeschraubt. Bei einem Dach mit 33° Neigung (nur als Beispiel) wäre der Dachhaken dann um 33° im Uhrzeiger gedreht montiert (im Vergleich zur Ausrichtung im obigen Bild).

Die Standardausführung von Dachhaken sollte für alle Standard-Ziegel geeignet sein.

Falls die Höhe des Standard-Dachhakens (Abstand Bodenplatte bis zum ersten Knick) nicht genügt, um über den Ziegel (an den die Bodenplatte stößt) zu kommen, dann legt man etwas unter, um an Höhe zu gewinnen (z.B. ca. 1cm dicke Holzplatten bei meiner Tochter oder dicke U-Scheiben oder Kunststoff).

Falls die Höhe des Standard-Dachhakens (Abstand Bodenplatte bis zum ersten Knick) zu hoch ist, dann würde ich es einfach in Kauf nehmen. Das Dach wird dadurch nicht undicht und sehen tut man es auch nicht, weil die später montierten PV-Module darüber sind. Die Alternative wären Spezial-Dachhaken (die es nicht unbedingt geben muss), die wahrscheinlich einen Haufen Geld kosten. Oder das Ausklinken des Dachsparrens, was ganz sicher verboten ist und sogar ich (als risikobereiter Mensch) nicht tun würde.

Falls die Länge des Standard-Dachhakens (Abstand des ersten zum zweiten Knick) nicht genügt, um den oberen Ziegel wieder herunterzulassen, dann lässt man ihn ebenso weit herunter wie es geht und verzichtet auf den Rest. Das Dach wird dadurch nicht undicht und sehen tut man es auch nicht, weil die später montierten PV-Module darüber sind.

Ich habe an meinem Dach die jeweiligen Ziegel mit einem Trennschleifer ausgeklinkt. Das würde ich heute wegen der zwei genannten Gründe garantiert nicht mehr tun.

3.4 Die Bestellliste (mit Kleinkram)

Für eine PV-Anlage werden die nachfolgenden Komponenten benötigt. Ich habe versucht, die Komponenten preislich absteigend zu sortieren. Die preisliche Sortierung stimmt natürlich nicht in allen Fällen und ab der vierten Position eigentlich schon gar nicht mehr. Aber ab der vierten Position kommt Kleinkram, der nicht teuer ist.

- PV-Module
- Dreiphasiger Wechselrichter
- Alu-Profilschienen
- Profilschienenverbinder
- Dachhaken zur Befestigung der Alu-Profilschienen
- Holzschrauben zur Befestigung der Dachhaken an den Sparren (z.B. 8x80mm)
- Metrische Schrauben (z.B. M10x30) zur Befestigung der Aluschienen an den Dachhaken
- Verschlusskappen für jedes Ende der Aluschienen
- Mittelklemmen zur Befestigung der mittleren PV-Module
- Endklemmen zur Befestigung der PV-Module an den äußeren Enden
- Solarkabel (schwarz/blau und rot) 6mm²
- Erdungskabel (min. 16mm² laut (VDE 0185-305 / IEC 62305)
- Kabelschuhe für die Erdungskabel
- Stecker QC4 für die Solarkabel
- Stecker MC4 zwischen den Solarkabeln und dem Wechselrichter

Noch eine Anmerkung zu den Steckern an den Solarkabeln mit den Namen MC4 und QC4. Eigentlich gibt es nur einen einzigen Standard für Solarstecker und der heißt MC4. Einige Hersteller glauben aber, ihren Steckern einen eigenständigen Namen verpassen zu müssen. Im konkreten Fall waren die Steckverbinder an den PV-Modulen meiner Tochter als QC4 bezeichnet. Nach mehreren Recherchen kam jedenfalls heraus, dass sie voll kompatibel mit den MC4-Steckern sind. Das ist insofern ärgerlich, weil es im Internet Unmassen von MC4 Steckern gibt, aber keine QC4. Man denkt daher, dass man die preiswerten PV-Module nicht kaufen kann, weil es keine Stecker dafür gibt.

Anmerkungen zu Schraubenlängen:

Zur Verschraubung der Dachhaken auf den Sparren habe ich am Haus meiner Tochter pro Dachhaken zwei Holzschrauben 8x80mm genommen.

Soweit ich mich erinnere waren es verzinkte Schrauben, also kein Edelstahl. Verzinkte Schrauben sind weniger spröde und scheren daher nicht so leicht ab.

Bei einer Aufdachdämmung (auf meinem Dach: 120mm Styropor) sind auf der Dämmung Längsrahmen (ca. 7cmx5cm) aufgeschraubt (Sparren → Dämmung → Längsrahmen in der gleichen Richtung wie die Sparren). Daher muss man auf einem solchen Dach die Dachhaken auf den Längsrahmen anstatt auf den Sparren aufschrauben. Daher habe ich jeden Dachhaken auf meinem Dach mit einer kurzen (8x80mm) und einer langen (80mm+50mm+120mm → 8x250mm) Schraube aufgeschraubt. Derart lange Schrauben muss man mit einem Schlangenbohrer (z.B. 6x300mm) vorbohren. Für die kurzen Schrauben ist ein normaler 6mm Holz- oder Metallbohrer lang genug.

Metrische Schrauben M10 zur Verschraubung der Aluminiumprofile auf den Dachhaken: Bitte nicht zu lang bestellen. Ich hatte M10x40mm für meine Tochter bestellt. Eindeutig zu lang. Das Aufsetzen der Mutter wird dann zur Quälerei. Besser M10x30mm. Das vereinfacht die Montage.

Ich empfehle eine Testbestellung an Dachhaken (einer oder zwei), um vor der eigentlichen Großbestellung ein bisschen damit herumexperimentieren zu können. Außerdem ein bisschen Solarkabel, mehrere MC4-Steckerpärchen und eine Quetschzange, um das Anquetschen der Solarkabel an die MC4-Stecker zu üben.

4. Die Montage der PV-Anlage

Man sollte für alle nachfolgend beschriebenen Arbeiten zu zweit sein. Allerdings war ich auf meinem eigenen Dach im Jahr 2011 alleine. Grundsätzlich ist etwas riskanter, die Arbeiten ganz alleine auszuführen und man muss sich häufiger etwas überlegen (z.B. die noch nicht montierten Profilschienen oder die PV-Elemente mit einem Gurt zu sichern, um den fehlenden Helfer zu ersetzen).

4.1 Gerüst stellen

Ich hatte mich mit einem kostenlos ausgeliehenen, rollbaren Gerüst von ca. 3m Länge und 3m Höhe begnügt. Das Gerüst wurde immer zur jeweiligen Montagestelle der untersten Reihe Dachhaken gezogen. Die Fertigstellung der untersten Reihe Dachhaken und das Aufschrauben der Aluschienen hat das Gehen auf dem Dach ganz erheblich sicherer gemacht. Außerdem hatte ich

einen Zurrkurt mit einem Karabinerhaken am Ende, mit dem ich mich während der gefährlicheren Arbeiten per Einklinken an der Aluschiene gesichert habe.

Wenn man sich ein Gerüst um das ganze Haus bauen lässt, kann das schnell ein paar Tausender kosten. Der Kauf eines rollbaren Gerüsts im Baumarkt kostet jedenfalls deutlich weniger.

4.2 Die Unterkonstruktion (Dachhaken und Aluschiene)

Zunächst muss man festlegen, oberhalb welcher Ziegelreihen die Dachhaken gesetzt werden. Ich weise darauf hin, dass es im Hinblick auf die stattlichen Ziegellängen die perfekte Dacheinteilung nicht geben wird. Es wird am Ende nicht so sein, dass z.B. jede PV-Modulreihe 40cm Abstand nach unten (untere Aluschiene zum Modulrand), 40cm nach oben und 100cm dazwischen hat. In vielen Fällen wird es sogar so sein, dass man gar keine Flexibilität hat, weil es einfach nicht genug Ziegelreihen gibt. Beispiel: Die Dachhaken können nur in die 3., 5., 8., 10., 13. und 15. Reihe von unten und sämtliche Abstände (Modulränder zu den Aluschiene) ergeben sich einfach und sind in allen drei Modulreihen verschieden.

Anmerkungen zur Dacheinteilung:

Bitte darauf achten, dass der unterste Modulrand (unterer Rand der untersten PV-Reihe) sich noch um einen bestimmten Abstand oberhalb der Dachrinne befindet, damit bei Starkregen das Wasser nicht über die Dachrinne hinausschießt.

Wenn das Dach hoch genug (Abstand Dachrinne zu Dachfirst) ist, dann würde ich 20cm Abstand zwischen den PV-Modulreihen einplanen. Es könnte hilfreich sein, falls eines Tages Module demontiert werden müssen (z.B. beim Ausfall eines Strings). Wenn ich mir allerdings die PV-Anlagen auf den Dächern Deutschlands ansehe, dann sind Abstände zwischen den Modulreihen eher eine Seltenheit.

Der/die weggeschobenen Dachziegel liegen auch nicht immer schön mittig auf einem Sparren, sondern ganz unterschiedlich von mittig bis Rand (die Trennlinie zweier Dachziegel verläuft genau auf einem Sparren).

Montage der Dachhaken:

- 1) Ziegel hochschieben (dort wo der Dachhaken hinsoll).
- 2) Bodenplatte auf den Dachsparren legen (die Bodenplatte muss nach oben Richtung Dachfirst zeigen) und vorbohren (z.B. 6mm). Danach mit zwei Holzschrauben festschrauben (siehe Anmerkungen zu Schraubenlängen im vorherigen Kapitel).

- 3) Den hochgeschobenen Ziegel wieder zurückschieben in seine ursprüngliche Position (siehe Anmerkungen zu den Dachhaken im vorherigen Kapitel).

Aluminiumprofile:



Aluminium Profil Schletter Solo

Das oben dargestellte Aluminiumprofil hat zwei identische Seiten, rechts und links. Diese beiden Seiten sind für die Aufnahme der Profilschienen-Verbinder gedacht. Die Verbinder sind ca. 20cm lange Aluminium-Formteile, die man jeweils ca. 10cm in die beiden, miteinander zu verbindenden Teil schiebt. Die Verbinder werden zusammen mit Gewindeschneidschrauben geliefert. Man bohrt zwei Löcher in jede Seite (ich glaube 3mm, aber ich weiß es nicht mehr genau) und schraubt anschließend die Gewindeschneidschrauben ein. Nach der Montage zeigen die beiden identischen Seiten zur Dachrinne bzw. zum Dachfirst.

Die Unterseite des Profils (rechteckiger Kanal zur Aufnahme eines metrischen Schraubenkopfs M10) wird mit dem Dachhaken verschraubt und ist nach der Montage auch auf dem Dach unten (den Ziegeln zugewandt).

Die Oberseite des Profils hat eine Kanalform, die maßgeschneidert zur Aufnahme der Mittel- und Endklemmen ist. In diesen Kanal kann man nach der Verschraubung des Profils auf dem Dach die Mittel- bzw. Endklemmen eindrücken und verschieben. Nach der Montage zeigt die Oberseite der Profilschiene zum Himmel.

Montage der Aluschiene:

- 1) Aluschiene Stücke auf dem Boden (nicht auf dem Dach) mit Hilfe der Verbinder zur richtigen Endlänge zusammenschrauben. Bis 10 Meter ist gar

kein Problem, da die Profile nicht sehr schwer sind. Vermutlich sind sogar 15 Meter Endlänge kein Problem.

- 2) Anzahl der Dachhaken, auf welche die Schiene aufgeschraubt werden soll, zählen und die gleiche Anzahl an metrischen Schrauben (z.B. M10x30mm) in die Unterseite der Profile einschieben. Die Aluminiumprofile werden nun ans Dach angestellt. Dabei fallen die eingesteckten M10 Schrauben nicht heraus, weil sie sich typischerweise etwas verklemmen. Man müsste sie schon einfetten, damit sie von alleine herausfallen.
- 3) Ab hier finden die Arbeiten auf dem Dach statt. Aluprofil zur Montageposition tragen und umdrehen (M10 Schrauben nach unten). Einen mittleren Dachhaken (ungefähr in der Mitte der Profilschiene) von Hand mit der Profilschiene verschrauben. Es genügt, wenn die Schraube ein Stückchen aus der Mutter herauschaut. Achtung, bitte nicht bei der Anzahl der eingeschobenen Schrauben, die links und rechts der gerade gesetzten sein müssen, verzählen. Sonst kostet die Fehlerkorrektur unnötig Zeit.
- 4) Nun die restlichen Schrauben von der Mitte der Schiene nach außen schieben und von Hand verschrauben. Anschließend alle Schrauben mit einem Schraubenschlüssel anziehen.

4.3 Erdung der Profilschienen

Die Profilschienen müssen geerdet werden. Dafür braucht man mindestens 20 Meter Erdungskabel (bitte ausmessen). Ich würde den geforderten Minimalquerschnitt nicht überschreiten. Je dicker, desto schwieriger zu verarbeiten. Außerdem braucht man 10-er Kabelschuhe (wegen der M10-er Schrauben), die an das Erdungskabel angequetscht werden müssen. Ich würde auf einer Dachseite unten beginnen und jeweils ein Kabel von der untersten zur nächsthöheren Profilschiene maßfertigen und jeweils am ersten Dachhaken (dort wo die Profilschiene festgeschraubt ist), also immer ganz außen, mit einer zusätzlichen Mutter festschrauben. Ab der zweiten Profilschienenreihe kommen dann immer zwei Kabelschuhe unter eine Mutter. Falls die M10-er Schraube nicht lang genug ist, kann man die Schraube, mit der die Profilschiene festgeschraubt ist, wieder lösen und beide Kabelschuhe unter die Mutter setzen. Das ist natürlich ärgerliche Extraarbeit. Vielleicht sollte man die M10-er Schrauben doch mit einer Länge von 35mm bestellen.

Beispiel mit 6 PV-Reihen → 12 Profilschienenreihen: Man also muss insgesamt 11 Erdungskabel maßfertigen, von denen eines über die Dachspitze geht. Am Ende soll es so aussehen, wenn man sich die Erdung vor dem Haus stehend von unten betrachtet: Dann muss ein Erdungskabel z.B. auf der linken Hausseite, ca. 1m neben dem linken Dachrand, über beide Dachhälften verlaufen.

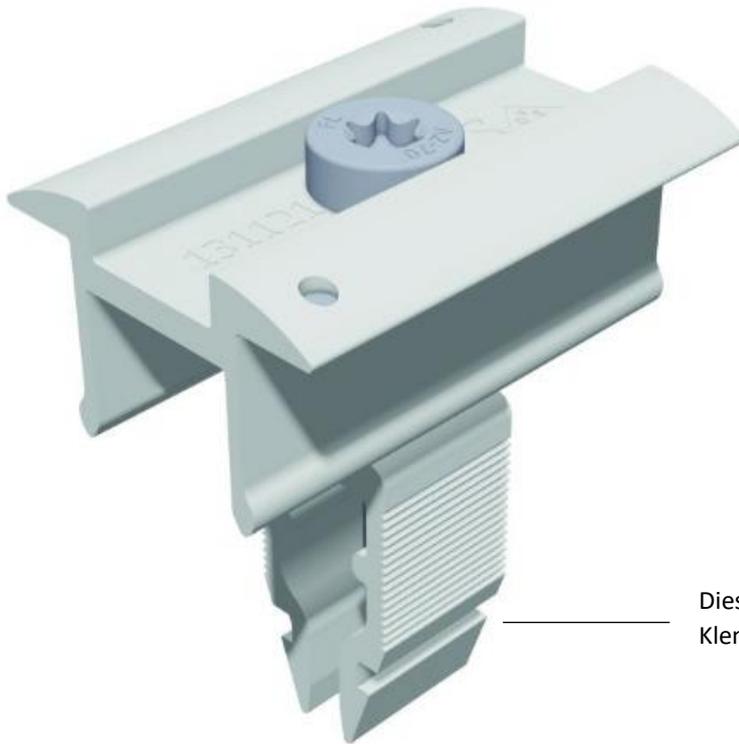
Nun muss aber noch die eigentliche Erdung stattfinden, d.h. die Verbindung der nun miteinander verbundenen Profilschienen mit dem Erdreich. Ich bin kein Fachmann auf diesem Gebiet und weiß nicht, welche Anforderungen und welche Verbote gelten. Daher sind die folgenden Aussagen gleich doppelt ohne Gewähr:

Mir gefällt die Vorstellung, die Erdung über das Hausinnere zu beziehen, absolut nicht. Wenn ich mir vorstelle, der Blitz würde tatsächlich ins Dach einschlagen, dann löst die Vorstellung, eine Million Volt würden nun in mein Haus abgeleitet, starke Hausverlustängste aus. Aus diesem Grund habe ich das bereits aus dem Haus nach außen geführte Erdungskabel (zusammen mit sechs PV-Kabeln; allerdings hatte ich zu diesem Zeitpunkt noch nicht über das Thema Erdung nachgedacht) nicht an der PV-Anlage meiner Tochter angeschlossen und das Erdungskabel direkt am Hausaustritt gekappt. Stattdessen habe ich ein ca. 2m langes T-Stahl-Stück an einer Mauer im Freien festgeschraubt und über die Dachrinne nach oben geführt und an den Profilschienen angeschlossen. Jetzt kann ich besser schlafen.

4.4 Die PV-Elemente montieren

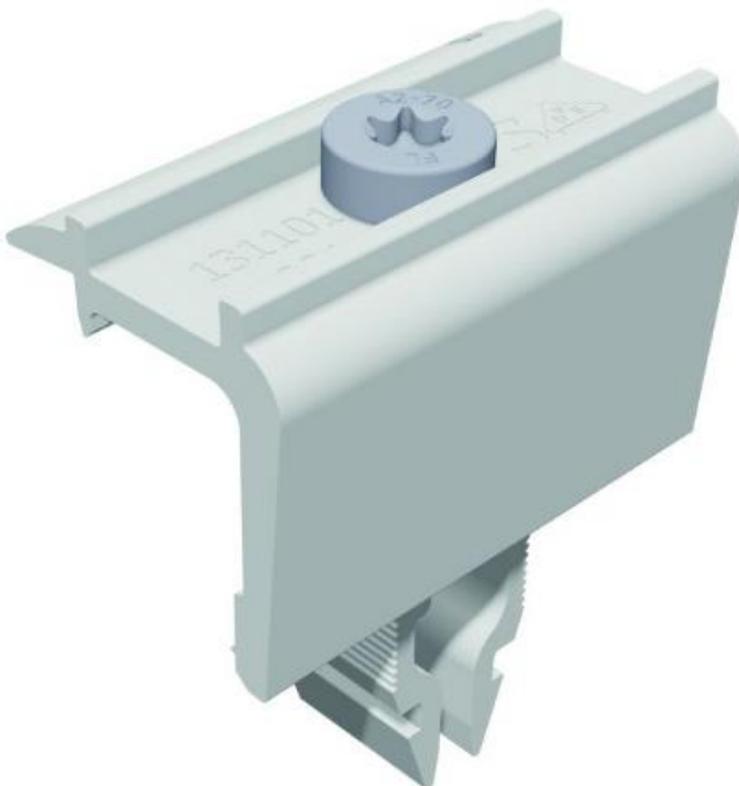
Einleitend ein paar Worte zu den Mittel- und Endklemmen. Es sind die reinsten Wunderteile. Supereinfach zu verarbeiten. Der Unterschied zwischen den beiden ist, dass sich eine Mitteklemme auf zwei PV-Elementen abstützt und eine Endklemme nur auf einem. Stattdessen muss auf der anderen Seite der Endklemme eine Aluminiumflanke das Abstützen übernehmen.

Mitteklemme:



Diese Nut setzt sich in den Klemmenkanal der Profilschiene

Endklemme:



Diese Seitenwand aus Aluminium ist der Unterschied zwischen einer Mittel- und Endklemme

Bevor man mit der Montage beginnt muss man sich sehr genau überlegen, in welcher Reihenfolge man die PV-Elemente setzt. Je weniger überschüssiger Platz auf dem Dach ist, desto genauer muss man sich vor dem Montagebeginn die Reihenfolge überlegen. Als Faustregel gilt: Dort wo man ein PV-Element festschraubt, kommt man nicht mehr hin. Es ist ab diesem Zeitpunkt sozusagen

gesperrte Dachfläche. Wenn man das komplette Dach mit PV-Elementen belegen möchte, dann muss man an der von der Hauseinführung der PV-Kabel entferntesten Stelle beginnen und in der Nähe der Hauseinführung das letzte Element montieren. An die Kabelanschlüsse der Hauseinführung muss man immer einigermaßen problemlos drankommen bzw. spätestens nach der Demontage eines gut erreichbaren PV-Elements. Ideal (wenn man das Dach komplett voll machen will) wäre die folgende Konstellation:

- Die Hauseinführung ist auf der Straßenseite, auf der auch das rollbare Gerüst steht.
- Die Hauseinführung erfolgt in der Nähe des unteren Dachrands.
- Man beginnt die Montage der PV-Element auf der gegenüberliegenden Dachseite.

Die beschriebene Konstellation ist an vielen Dächern nicht gegeben. Man muss sich in diesen Fällen überlegen, ob man nicht ein paar PV-Elemente weglässt, also ein bisschen Dachfläche unbestückt lässt.

Montage der PV-Elemente:

- 1) PV-Element auf zwei Aluminium-Profilschienen auflegen und ausrichten.
- 2) Falls es ein Endelement ist kann man zwei Endklemmen setzen und festschrauben. Ich habe einen Akkuschauber verwendet und die Drehmomentbegrenzung auf einen oberen Mittelwert eingestellt. Das Anschrauben eines Elements dauert maximal 10 Sekunden. Im Falle eines Mittelelements drückt man zwei Mittelklemmen in die Profilschiene und schiebt sie an das letzte, montierte PV-Element heran. Nun legt man das zu montierende PV-Element auf und richtet es aus. Nun schraubt man die beiden Mittelklemmen fest.

Anmerkung zur Montage von PV-Endelementen:

Wenn man das Dach komplett mit PV-Elementen bestückt und daher an den Dachrändern keinen Platz für seitliche Montagearbeiten hat, dann kann man die PV-Elemente auch betreten. Ich würde mir dazu ein oder zwei preiswerte Hartschaumplatten (z.B. 125x60x3cm) im Baumarkt kaufen, zwecks Zerstörungsschutz auf das PV-Element legen und das PV-Element vorsichtig betreten (wenn man sehr viel weniger als 100 kg wiegt) bzw. mich draufsetzen. Ich habe es so ähnlich mit einem gepolsterten Stück Gerüstdielen gemacht und mich auf diesen gesetzt (ich wiege 100 kg). Eine Hartschaumplatte ist aber die bessere Wahl. Grundsätzlich sind die PV-Elemente sehr robust, weil sie gegen Starkhagel geschützt sein müssen. Die halten das aus, zumindest wenn man einigermaßen vorsichtig vorgeht.

4.5 Die PV-Elemente verkabeln

Vorweg eine Definition. Als Männchen werden Stecker mit „Pimmel“ bezeichnet, wobei die Form des Metallkontakts der Namensgeber ist und nicht das Plastik. Weibchen sind das Gegenstück, also mit einem Loch im Metallkontakt. Man steckt das Männchen in das Weibchen und hat danach einen elektrisch leitenden Kontakt. PV-Elemente führen im Gegensatz zu Steckdosen eine Gleichspannung. Rein schmerztechnisch gibt es aber keinen Unterschied, ob man von Gleich- oder Wechselspannung eine gewischt bekommt. Es tut ungefähr gleich weh. Aber es gibt einen anderen Unterschied:

Unterschied zwischen Haushalts- und PV-Strom:

Ein Haushaltsgerät hat einen Stecker und der hat zwei Männchen. Die Männchen führen keine Spannung (im nicht eingestöpselten Zustand) und sind daher ungefährlich. Eine Haushaltssteckdose führt Spannung und hat zwei Weibchen als Kontakte. Die Weibchen sind daher gefährlich.

Jedes PV-Elemente hat zwei Kontakte, nämlich ein Männchen und ein Weibchen. Ich weiß im Moment gar nicht, welcher Pol (Minus oder Plus) des PV-Elements das Männchen und welcher das Weibchen ist. Weil das nämlich auch egal ist. Der Plus-Kontakt (beide Kontakte sind mit Plus und Minus beschriftet) des ersten Elements wird auf den Minus Kontakt des zweiten Elements geführt. Am Ende sind alle PV-Elemente eines Strings in Reihe geschaltet und spätestens ab dem dritten Element ist es egal, ob man an den Minus- oder Pluskontakt greift. Man bekommt an beiden eine gescheuert. Und je weiter hinten in der Reihenschaltung man einen Kontakt angreift, desto weher tut es. Ich habe einmal im Leben im Motorraum eines Autos an einer Zündkerze eine gescheuert bekommen. Das waren über 20 000 Volt. Das vergisst man nie im Leben. Dagegen sind 900 Volt am Ende einer PV-Reihenschaltung regelrecht erträglich. Ich will das aber nicht verharmlosen. Aufpassen!

Die ganze PV-Verkabelung beginnt und endet an der Übergabestelle zur Hauseinführung. Ich bezeichne die drei PV-Strings als R, S und T (wobei diese Bezeichnungen, glaube ich, eher für die Wechselspannungsphasen gebräuchlich sind, als Alternativen zu L1, L2 und L3).

Zur Verkabelung der PV-Element braucht man PV-Kabel (oder auch als Solarkabel bezeichnet) und eine Menge MC4-Stecker. Ich hatte für meine Tochter 20 MC4-Pärchen (also 20 Männchen plus 20 Weibchen) bestellt und die haben gerade so gereicht. An Solarkabel hatte ich sogar jeweils 100m rot und 100m blau bestellt, weil 50m von jeder Sorte knapp nicht gereicht hätten. Als Querschnitt hatte ich 6mm² genommen. Dieser Querschnitt lässt sich noch gut verarbeiten, darüber wird es schwieriger. Ich habe die MC4-Stecker mit einer Flachzange angequetscht und anschließend verlötet, weil ich mit einer speziellen

Quetschzange ziemlich schlecht umgehen kann. Wenn jemand beides nicht kann, dann empfehle ich, sich den Umgang mit einer Quetschzange beizubringen. Das ist auf jeden Fall professioneller. Quetschzange, MC4-Stecker und Kabel bestellen und ein bisschen üben. Nach fünf zerquetschten Männchen plus fünf Weibchen sollte man es einigermaßen hinkriegen. Falls nicht, dann muss man eben ein komplettes Päckchen mit 40 MC4-Steckern „verüben“ bis man es kann. Ein MC4-Pärchen kostet etwas über einen Euro in der Großpackung. Das ist bezahlbar.

Ein selbst gebasteltes Kabel braucht immer ein Männchen und ein Weibchen. Man muss darüber nicht groß nachdenken. Man steckt die passende Seite des Kabels auf das Modul und die andere Seite hat dann schon den richtigen Anschluss für die Weiterführung (z.B. in den Keller auf den Wechselrichter).

Verkabelung der PV-Elemente:

- 1) Testverlegung des ersten blauen Kabels von der Übergabestelle Hauseinführung (oder Ausmessen der erforderlichen Länge mit einem Bandmaß). Anbringen der beiden Stecker, also ein Männchen auf der einen Seite und ein Weibchen auf der anderen. Aufstecken des Kabels am Minuspol des ersten PV-Moduls (String S) bis zum Einrasten der Steckverbindung. Finale Verlegung des Kabels und eventuelle Fixierung des Kabels mit ein paar Kabelbindern.
- 2) Anschrauben des nächsten PV-Moduls. Aufstecken des Pluspols des ersten PV-Elements auf den Minuspol des gerade angeschraubten nächsten PV-Elements.
- 3) Die im Punkt 2 beschriebene Vorgehensweise wiederholt man nun für alle PV-Elemente des ersten Strings, d.h. man benötigt kein selbstgebasteltes Kabel, sondern man verbindet immer nur den Pluspol des einen Elements mit dem Minuspol des nächsten. Die Kabellängen sind dabei reichlich. Es reicht in der Regel sogar, wenn man z.B. am Ende einer PV-Reihe angelangt ist (ohne das Ende des Strings bereits erreicht zu haben), das PV-Element, das dann eine Reihe höher sitzt, ohne ein selbstgebasteltes Kabel zu erreichen. Kommt vor dem nächsten PV-Element ein Hindernis (z.B. ein Dachfenster oder ein Entlüftungsziegel), dann muss man wieder ein PV-Kabel in der richtigen Länge selbst herstellen.

Anmerkung zu den Farben der selbstgebastelten PV-Kabel:

Im Prinzip könnte man auf dem Dach eine neutrale Farbe (z.B. Schwarz anstatt Blau und Rot) für alle Kabel verwenden, da der Minuspol und der Pluspol der beiden miteinander zu verbindenden Elemente die gleiche Spannung führen. Aber es macht Sinn, wenn am Ende der Installationsarbeiten drei Blaue und drei rote Kabel vor dem Wechselrichter baumeln. Daher schadet es auch nicht, auch auf dem Dach die beiden Farben

Blau und Rot zu verwenden. Der einfache Fall: Wenn ein selbstgebasteltes PV-Kabel zum Minuspol des PV-Elements geht, dann verwendet man ein blaues Kabel und rot, wenn es zum Pluspol geht. Der schwierigere Fall: Wenn das Kabel den Minuspol des einen Elements mit dem Pluspol des nachfolgenden Elements über ein selbstgemachtes Kabel verbindet, dann verwendet man ein rotes Kabel (für Gefahr) oder eine neutrale Farbe (z.B. schwarz), falls man sich eine dritte Farbe antun will.

Messen nicht vergessen:

Ich empfehle die Anschaffung eines digitalen Multimeters für 10.- € (bis 600 Volt Gleichspannung; die Multimeter bis 1000 Volt sind teurer), um nach der Installation jedes Elements die erzeugte Gesamtspannung der PV-Reihenschaltung zu messen. Man wird wohl nicht umhinkommen, sich ein langes Kabel zum Minuspol seines Multimeters zu basteln. Wenn man genügend blaues PV-Kabel hat, dann nimmt man 15m davon (jedenfalls lange genug, um alle drei PV-Strings zu vermessen). Auf dieses Kabel quetscht man das Gegenstück zum Minuspol des ersten Strings an der Übergabestelle. Auf der anderen Seite des Kabels isoliert man ca. einen Zentimeter ab. Da es der Minuspol des ersten Strings ist, ist da keine Spannung drauf, es ist also ungefährlich. Man steckt das Kabel auf den Minuspol des ersten Strings und führt das blanke Ende immer mit an die Messstelle. Zum Messen habe ich mich immer auf den Hintern gesetzt und das Multimeter im eingeschalteten Zustand (Messbereich: 600V oder 1000V Gleichspannung) auf meine Knie gelegt. Mit der linken Hand drückte ich das blanke Kabelende auf die Minus-Messspitze am Multimeter. Die Plus-Messspitzen des Multimeters habe ich dann in den Pluspol des PV-Elements gesteckt bzw. diesen berührt. Nach jedem Element muss die Gesamtspannung des Strings um die Leerlaufspannung des Solarmoduls ansteigen, also um ca. 35 Volt. Messen ist viel besser als eine negative Überraschung am Ende eines Strings oder gar erst, wenn der Wechselspannung-Elektriker den Keller betritt, um zur Tat zu schreiten.

- 4) Ermittlung der Kabellänge für ein rotes, selbst gebasteltes Kabel vom Pluspol des letzten PV-Elements des ersten Strings zur Übergabestelle. Nun die beiden Stecker anbringen und das Kabel mit dem letzten Element des Strings verbinden (d.h. MC4-Stecker einrasten). Das Pluskabel des ersten Strings final zur Übergabestelle verlegen und evtl. ein paar Kabelbinder spendieren. Sicherheitshalber an der Übergabestelle noch einmal die String-Spannung messen. Es sollten, abhängig von der Anzahl und Eigenschaft der PV-Elemente, ein paar Hundert Volt sein.

Achtung, String-Markierung nicht vergessen:

Ich habe die drei Strings in der Nähe des Steckers (ca. 20cm bis 30cm entfernt) mit einem/zwei/drei Isolierbandringen gekennzeichnet, weil jede

spätere Messung immer relativ zeitaufwändig ist (die Vorbereitung der Messung erfordert den Zeitaufwand, um genau zu sein) bzw. gar nicht mehr möglich ist. Man kann zwar später herausmessen, welche zwei Kabel einen String bilden, aber nicht mehr, welcher String R (z.B. unterste Reihe auf der abgelegenen Dachseite), S und T ist bzw. erst nach der Demontage von PV-Elementen. Ich bevorzuge 1/2/3 Isolierbadringe gegenüber 0/1/2, weil ich bei null Ringen immer ins Grübeln komme (Isolierband abgerissen oder ein Stück Kabel abgeschnitten?). Wenn man drei verschiedene Isolierbandfarben hat, dann wird die Kennzeichnung noch ein bisschen besser bzw. einfacher. Achtung, Aufschreiben und Archivierung nicht vergessen (z.B. R=grün, S=rot und T=schwarz), da man diese Information eines Tages brauche könnte.

- 5) Nun die beiden anderen Strings S und T genauso installieren und anschließen wie den ersten String R.
- 6) Nun müssen die PV-Kabel noch von der Übergabestelle ins Haus gelegt werden. Kabellänge bestimmen und Kabel entsprechend anfertigen. An der Übergabestelle kann man schon die Stecker anbringen, aber die Kabel dürfen wegen der PV-Spannung noch nicht aufgesteckt werden. Auf der Wechselrichterseite dürfen die Stecker noch nicht angebracht werden, weil man die Kabel wahrscheinlich durch Wandbohrungen durchführen muss. Nun werden die Kabel zum Wechselrichter geführt, markiert (R, S und T), die Stecker werden angebracht. Danach werden die Stecker an der Übergabestelle aufgesteckt. Das Aufstecken am Wechselrichter übernimmt der Elektriker nachdem er die Wechselspannungsseite verkabelt hat.

Teil 2

22. Februar 2022

5. Die PV-Anlage meiner Tochter

Anbieter von PV-Komponenten:

Der beste Anbieter für Photovoltaik-Komponenten lautet nach meinen aktuellen Recherchen (Februar 2022) immer noch [TST-Photovoltaik](#) in 84337 Schönau. Sie haben das größte Sortiment und die besten Preise. Aber man findet bei anderen Anbietern (Google Shopping: PV-Modul) auch immer wieder mal ein günstiges Angebot, z.B. JA Solar 400W bei Solarlager24 für 185.- € pro Stück.

Ich hatte übrigens 2011 meinen SMA-Wechselrichter nicht bei TST gekauft, weil ich ihn woanders mindestens 300.- € billiger bekommen hatte.

Überraschenderweise bietet die Fa. TST keine Trägerprofile mehr an (ich hatte von TST: Schletter Solo 05, das jetzt nur noch Solo heißt) und auch nur noch teure Dachhaken, von denen wir über 100 Stück brauchen. Ich werde also nicht umhinkommen, die PV-Komponenten bei verschiedenen Anbietern zu bestellen.

Berechnung der Anzahl an PV-Modulen:

Die zur Verfügung stehende Dachfläche beträgt maximal ca. **10,90m x 5,90m**. Zwingend berücksichtigt werden müssen auch das Dachfenster und die beiden Lüftungsziegel, die nicht überdeckt werden dürfen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Mittelklemmen pro Stück auch ca. 2cm pro Modul benötigen und somit der Modulbreite zugeschlagen werden müssen. Bei einer maximalen Modulbreite von 120cm (inkl. Mittelklemme) und einer maximalen Modullänge von 190cm passen so viele Module aufs Dach:

Talseite: 3 x 9 = 27 PV-Module

Straßenseite: Obere Reihe → 7 Module (wegen der Lüftungsziegel)
Zweite Reihe bis zum Fenster (773 cm) → 6 PV-Module
Dritte Reihe bis zum Fenster → 6 PV-Module plus zwei
nördlich daneben

Insgesamt passen daher $27 + 7 + 6 + 6 + 2 =$ **48 PV-Module** → 16 PV-Module pro Phase

Bedingungen, die das PV-Modul erfüllen muss:

- Gutes Preis-Leistungsverhältnis (Watt pro Euro)
- Maximal 1,90m lang / 1,20m breit, sonst passen keine 3 Reihen / 9 Module aufs Dach

Leistungsmäßig gibt es keine Grenze, da es Wechselrichter bis 30 KW mit gutem Preis-Leistungsverhältnis gibt. Oberhalb von 30 KW gibt es bei allen Anbietern einen Sprung auf 100 KW. Aber in dieser Leistungsklasse bewegen wir uns nicht. Das leistungsstärkste Modul, das ich bei TST-Elektronik gefunden habe, hat 495 Watt Peak-Leistung. $495 \text{ Wp} * 48 = 23,76 \text{ KWp}$.

Die meisten PV-Wechselrichter können DC-Spannungen von ca. 150V bis 1000V verarbeiten. $1000 \text{ V} / 16 = 62,5 \text{ V}$ Leerlaufspannung. Die Module mit der höchsten Leerlaufspannung liegen maximal bei 50 V. Das bedeutet, dass auch die Leerlaufspannung kein Kriterium bei der Auswahl ist.

Da ich sowieso immer auf ein gutes Preis-Leistungsverhältnis achte, bleibt eigentlich nur die Länge von 190cm und Breite von 120cm, die ein PV-Modul nicht überschreiten darf.

Bestimmung des zu verbauenden PV-Moduls:

Die PV-Module mit dem besten Preis-Leistungsverhältnis (Watt pro Euro) bei TST haben eine Leistung von 405 Watt und kosten 178.- € pro Stück ($178.- \times 48 = 8544.-$ €). Sie heißen [JAM54S-30-405-MR](#) von der chinesischen Fa. JA Solar. Diese Module sind 173cm lang und erfüllen die zuvor genannten Kriterien. Die Peak-Gesamtleistung beträgt **19 440 Watt**. Da aber der Wirkungsgrad hausausrichtungsbedingt nur ca. 70% beträgt, ergibt sich eine reale Peak-Leistung von **13 608 Watt**. Nach meiner Einschätzung kann man mit dieser Leistung mit ca. 13 000 KWh erzeugtem Strom pro Jahr rechnen. Die Abmessungen des Moduls betragen 1722 x 1134 x 30 mm, die Leistung 405 Watt und die Leerlaufspannung 37,23 V ($\times 16 = 595$ V pro String) und die Nennspannung 31,21 V ($\times 16 = 500$ V pro String).

Der Hersteller JA Solar gibt eine Produktgarantie von 12 Jahren auf die Module sowie 25 Jahre lineare Leistungsgarantie (typisch sind 80% nach 20 Jahren). Die Chancen, Garantieansprüche gegenüber der Fa. JA Solar geltend machen zu können (also sozusagen die Überlebenschancen der Firma) sind gut (<https://gruenes.haus/ja-solar-test-erfahrungen/>).

Bestimmung des zu verbauenden Wechselrichters:

Bei einer auf den Modulen auftreffenden Peak-Leistung von 13 608 Watt (Berechnung siehe oben), genügt daher eine Wirkleistung des PV-Wechselrichters von 15 KW. Den dreiphasigen Wechselrichter [Solis 15.0 4G DC](#) (von der chinesischen Firma Ginglong) mit 15 KW Leistung bekommt man für 1305.- € bei TST mit 10 Jahren Garantie. Der Sunny Tripower 15000TL von der deutschen Firma SMA kostet ungefähr das Doppelte.

Die Fa. Ginglong gehört zu den etablierten Solarfirmen und den weltweit größten Produzenten von Wechselrichtern. Die Chancen, irgendwann Garantieansprüche gegenüber der Fa. Ginglong geltend machen zu können, sind gut.

Bestimmung des Montagesystems:

Grundsätzlich findet man über eine Google Suche eine ganze Menge von Anbietern, z.B.: Klöber, Easy Top, Alubel, Icosun, Bisol, Heckert, Meyer Burger, Sunfix, Mprime, Wagner, Braas, Sun, Sunset, Thesan, Capa, Sunerg, Fischer, K2, etc.. Wenn man nun einen der Links betätigt, dann bekommt man die nicht sehr hilfreiche Botschaft: "Jetzt Infomaterial bestellen".

Anstatt die obige, ganz allgemeine Suche weiterzuverfolgen habe ich mir stattdessen die Namen der Montagesysteme bei TST (photovoltaik-shop.com) angesehen und gezielt nach Firmennamen und Montagesystem gegoogelt. Nur bei Schletter und K2 bekommt man Treffer und hat auch ein bisschen Auswahl bei den Anbietern. Da ich auf meinem Dach das Schletter Montagesystem

verbaut habe und damit qualitativ hochzufrieden bin, entscheide ich mich wieder für die das Produkt Schletter Solo mit den zugehörigen Mittel- und Endklemmen und Verschlusskappen.

Bedarf an Alu-Profilschienen:

Die PV-Module sind 113,4 cm lang. Ich rechne 2 cm für die Klemmen hinzu, was zu einer effektiven Modulbreite von 115,4 cm führt.

Talseite: $9 \times 1,154 \text{ m} + 2 \text{ cm} = \mathbf{10,40 \text{ m}}$ pro Reihe; 6 Reihen + 1 auf der Straßenseite unten

Straßenseite: $2 \times 9,50 \text{ m}$ (die zwei oberen Reihen; berechnet aus Lage der Entlüftungsziegel)
 $3 \times 7,00 \text{ m}$ (die drei Reihen darunter: $6 \times 1,154 \text{ m} + 2 \text{ cm}$)
 $3 \times 1,20 \text{ m}$ (neben dem Dachfenster)

Insgesamt: $10 \times 10,40 \text{ m} + 2 \times 9,50 \text{ m} + 3 \times 7,00 \text{ m} + 3 \times 1,20 \text{ m} = \mathbf{116,40 \text{ m}}$.

Es gibt die Schletter Solo Profilschienen in den Längen 440 cm und 550 cm (und noch weiteren). Bei einer Länge von 550 cm brauchen wir:

7x 2 Schienen (Talseite + unterste Reihe Straßenseite) - Rest 7x 60cm; 2x 2 Schienen (1. und 2. Reihe Straßenseite von oben) - Rest 2x 1,50m; 2x eine Schiene (3. und 4. Reihe Straßenseite von oben) + **2x Rest von 1,50m**; 2 Schienen (5. Reihe Straßenseite von oben) - Rest 4,00m; Nördlich neben dem Dachfenster: **4,00m geteilt durch 3** = 1,66m; das reicht für die drei Profilvereihen neben dem Dachfenster. Insgesamt werden $14 + 4 + 2 + 2 = \mathbf{22 \text{ Alu-Profile}}$ benötigt; Probe: $22 \times 5,50 \text{ m} = 121,00 \text{ m}$. → 4,60m Abfall.

Bei einer Länge von 440 cm brauchen wir:

7x 2 Schienen (Talseite + unterste Reihe Straßenseite) plus 4 Schienen für die immer noch fehlenden Stücke - Rest 3x 1,20m + 1x 2,60m; 2x 2 Schienen (1. und 2. Reihe Straßenseite von oben) + **3x 0,70m Rest von 2,60m** → es bleiben **50cm Rest von dem 2,60m Stück**; 2x 2 Schienen (3. und 4. Reihe Straßenseite von oben) - Rest 2x 1,80m; 1 Schiene (5. Reihe Straßenseite von oben) + **1,80m Rest + 80cm von 1,80m** → es bleiben **100cm Rest von dem zweiten 1,80m Stück**; die drei 1,20m Stücke vom ersten Rest ganz oben reichen für die drei Kurzreihen nördlich neben dem Dachfenster; Insgesamt werden $14 + 4 + 4 + 4 + 1 = \mathbf{27 \text{ Alu-Profile}}$ benötigt; Probe $27 \times 440 \text{ cm} = 118,80 \text{ m}$ → 2,40m Abfall.

Bedarf an Profilschienenverbindern:

550 cm Länge: $9 \times 1 \text{ Verbinder} + 3 \times 1 \text{ Verbinder} = \mathbf{12 \text{ Verbinder}}$

440 cm Länge: $9 \times 2 \text{ Verbinder} + 3 \times 2 \text{ Verbinder} = \mathbf{22 \text{ Verbinder}}$

Für die 440 cm langen Alu-Profile kommen 10 Verbinder für mindestens 30.- € hinzu. Die Gesamtkosten unterscheiden sich daher kaum. Die 550 cm langen Alu-Profile erfordern weniger "Verbindungsarbeiten".

Bedarf an Mittelklemmen:

Ich habe die Anzahl der Mittelklemmen in dem Bild am Ende des Dokuments gezählt:

Insgesamt werden **78** Mittelklemmen benötigt ($3 \times 16 + 3 \times 10$).

Bedarf an Endklemmen und Verschlusskappen:

Ich habe die Anzahl der Endklemmen und der Verschlusskappen in dem Bild am Ende des Dokuments gezählt:

Insgesamt werden **36** Endklemmen und **26** Verschlusskappen gebraucht.

Bedarf an Dachhaken:

Anzahl Sparren: 17

Anzahl Dachhaken: 10 (zwei links, zwei rechts, dazwischen nur jeder zweite)

12 reihen mit Dachhaken, davon gehen 7 durch (auch auf der Straßenseite ganz unten), 2 sind etwas kürzer (minus 1), 3 sind durch das Dachfenster noch kürzer und benötigen nur 7 Haken.

Gesamtbedarf: **115** ($90 - 2 + 21 + 6$) für die zwei Elemente nördlich neben dem Fenster

Bedarf an Solarkabel:

Die PV-Module werden von der Talseite unten nach oben und auf der Straßenseite von oben nach unten montiert und während der Montage angeschlossen, weil man später gar nicht mehr an die Modulstecker kommt. Die nachfolgenden Längen werden jeweils ob der Oberkante Dachfenster (dort wo die PV-Kabel jetzt schon liegen) geschätzt plus jeweils ein bisschen Sicherheitszuschlag. Ich bezeichne die PV-Strings als R (Talseite ganz unten), S (Talseite oben und Bergseite oben) und T (Straßenseite).

Minusleitung Talseite R: $3,50\text{m} + 4\text{m} + 2,50\text{m} = \mathbf{10\text{m}}$ (hoch, runter, links).

Plusleitung Talseite R: $3,50\text{m} + 2,50\text{m} = \mathbf{6\text{m}}$ (hoch, runter)

Minusleitung Talseite S: $3,50\text{m} + 2,50\text{m} + 1\text{m} = \mathbf{7\text{m}}$ (hoch, runter links)

Plusleitung Straßenseite S: $1\text{m} + 4\text{m} = \mathbf{5\text{m}}$ (hoch, rechts)

Minusleitung Straßenseite T: $1\text{m} + 2\text{m} = \mathbf{3\text{m}}$ (hoch, rechts)

Plusleitung Straßenseite T: $\mathbf{1\text{m}}$ (rechts)

Außerdem kommt immer noch ein Meter rote Leitung von einer Modulreihe bis zu nächsten hinzu, also ungefähr 5m. Insgesamt brauchen wir **20m** schwarze Leitung und **17m** rote Leitung. Es muss nichts bestellt werden, da noch insgesamt 70m / 70m Leitung da sind.

Bedarf an Erdungskabel:

Die Alu-Profilschienen müssen (warum auch immer) geerdet werden. Der minimale Querschnitt von Erdungskabeln beträgt **16mm²**. Wir ziehen einfach eine Erdleitung von Schiene zu Schiene und brauchen dafür: 6m + 6m + 3m Zuschlag = **15m**.

Außerdem werden **30 Stück** 10-er Kabelschuhe zum Anncrimpen gebraucht. Alternativ könnte man auch an jedes Ende des Kabels (darf aber keine Litze sein) eine Öse biegen.

Bedarf an QC4/MC4 (Module/Wechselrichter) Stecker für die Solarkabel:

Leider sind am Wechselrichter andere Stecker als an den PV-Modulen verbaut. Daher müssen zwei verschiedene Steckersorten gekauft und verbaut werden.

MC4: **3 x MC4 Paare** zum Anschluss des Wechselrichters auf der DC-Seite.

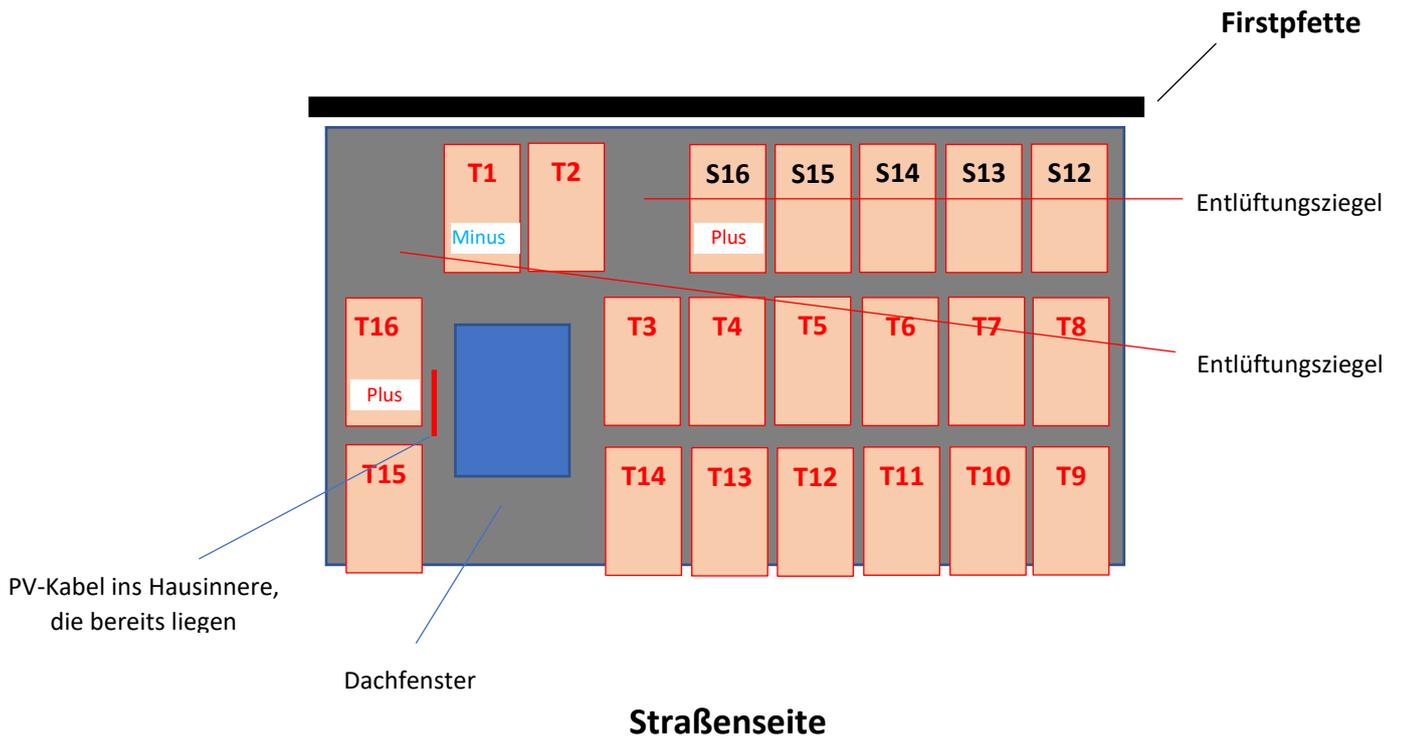
QC4: 6 QC4 Paare zum Anschluss der 6 Kabel zu den PV-Modulen
 3 QC Paare zum Anschluss der 3 Kabel, die schon auf dem Dach liegen
 6 QC Paare, um von einer Modulreihe zur nächsten springen.
 2 QC Paare, um die Entlüftungslücken zu überbrücken.

Insgesamt werden **17 x QC4** Paare benötigt. Achtung, der Standard für Solarstecker heißt MC4. Die Bezeichnung QC4 verwendet nur die Fa. JA Solar, weil der Begriff MC4 in manchen Ländern geschützt ist. Irgendwo hatte ich auch gelesen, dass QC4 bis 1500V Spannungsfestigkeit spezifiziert ist (MC4 nur bis 1000V). Hardwaretechnisch scheinen MC4 und QC4 vollkommen identisch zu sein. Man bekommt QC4 auch fast nicht zu kaufen.

Anschlussreihenfolge der PV-Module:

Talseite





Stringfarben: (Markierung der Solarkabel mit weißem, schwarzem und rotem Isolierband)

Weiß: Unterer String Talseite; Schwarz: Oberer String Talseite; Rot: String Straßenseite.

Bestellliste vom 28.02.2022:

Nr.	Anzahl	Komponente	Exakte Bezeichnung / Beschreibung	Einzelpreis	Gesamtpreis	Bester Anbieter	Link
1	48	PV-Module	JAM54S-30-405-MR	179,58 €	8.619,84 €	Photovoltaik-Shop	https://www.photovoltaik-shop.com/solarmodul-ja-solar-jam54s-30-405-mr-405wp-mono-halbzellen-schwarzer-rahmen.html
2	1	Wechselrichter	Solis 15.0 4G DC	1.304,54 €	1.304,54 €	Photovoltaik-Shop	https://www.photovoltaik-shop.com/wechselrichter-solis-15-0-4g-dc.html
3	117	Dachhaken	Edelstahl Dachhaken A2	4,69 €	548,73 €	aceflex.de bau-tech.shop	https://www.aceflex.de/produkt/1-stueck-edelstahl-dachhaken-a2-fuer-dachsteine-dachpfannen/
4	2	Unterlegscheiben	10,5mm Din 9021: 20 Stück (3-facher Außendurchmesser)	8,78 €	17,56 €	Wegertseder	https://www.wegertseder.com/DIN-9021-Scheiben-grosser-Aussendurchmesser-3x-Schraubendurchmesser-ROSTFREI-A2
5	1	Unterlegscheiben	8,4mm Din 125: 468 Stück (=> 1000 Stück)	26,30 €	26,30 €	Wegertseder	https://www.wegertseder.com/DIN-125-Unterlegscheiben-Form-A-bei-Stahl-Klasse-140-HV-ROSTFREI-A2
6	1	Holzschrauben	8 x 80 mm: 234 => 200 + 2x 20 Stück verzinkt	53,98 €	53,98 €	Wegertseder	https://www.wegertseder.com/DIN-571-Sechskant-Holzschrauben-STAHl-verzinkt
7	2	Metrische Schrauben	M10 x 40 verzinkt 10.9: 117 => 200 Stück zur Befestigung der Alu-Profile an den Dachhaken	27,94 €	55,88 €	Wegertseder	https://www.wegertseder.com/DIN-933-Sechskantschrauben-Gewinde-bis-Kopf-STAHl-10-9-verzinkt
8	1	Muttern	M10 verzinkt 10.9: 117 => 200 Stück zur Befestigung der Alu-Profile an den Dachhaken	54,38 €	54,38 €	Wegertseder	https://www.wegertseder.com/DIN-933-Sechskantschrauben-Gewinde-bis-Kopf-STAHl-10-9-verzinkt
9	24	Profilschienen-Verbinder	Schletter Solo: Bedarf 22 => 24 Stück	2,99 €	71,76 €	Treise Elektro	https://www.treise-elektro.de/Schletter-Solar-Verbinder-Einschub-Solo-Profi-Set?gclid=EAlaIqobChMI9PD6uKGi9gIVZpBoCR012QIDEAQYAIBEGJC3PD_BwE
10	27	Alu-Profilschienen	Schletter Solo 40x40mm und 440cm lang	37,54 €	1.013,58 €	Elektromax24	https://www.elektromax24.de/schletter-modultragprofil-solo-4400mm
11	2	Verschlusskappen	2x 20 Verschlusskappen Schletter Solo	9,94 €	19,88 €	Elektromax24	https://www.elektromax24.de/20-st.-schletter-kunststoff-endkappe-solo-profi05-schwarz
12	82	Mittelklemmen	Schletter Solo: Bedarf 78 => 82 Stück	1,43 €	117,26 €	Elektromax24	https://www.elektromax24.de/Schletter-Mittelklemme-Rapid-30-40-Alu-blank?gclid=EAlaIqobChMIp6-shfKD9gIVYJBoCR0-3gyCEAQYASABEGJ39_D_BwE

Nr.	Anzahl	Komponente	Exakte Bezeichnung / Beschreibung	Einzelpreis	Gesamtpreis	Bester Anbieter	Link
13	40	Endklemmen	Schletter Solo: Bedarf 36 => 40 Stück	1,43 €	57,20 €	Elektromax24	https://www.elektromax24.de/Schletter-Endklemme-Rapid-30-40-Alu-blank?gclid=EAlaIqobChMI3_X8hPOD9gIVAI5oCR3U9QcUEAQYASABEgKNk_D_BwE
14	1	MC4 Stecker	20 Steckerpaare MC4 (kompatibel zu QC4)	24,99 €	24,99 €	Kaufland	https://www.kaufland.de/product/356219972/?utm_source=shopping&utm_medium=non-paid&utm_campaign=pricecomparison&sid=31359684
15	15	Erdungskabel	16 mm ²	3,49 €	52,35 €	Kabelscheune	https://www.kabelscheune.de/NYY-Erdkabel-Starkstromkabel/Erdkabel-NYY-J-1x16-qmm-Erdungskabel-Meterware.html
16	3	Kabelschuhe	10 Stück M10 16 mm ²	2,98 €	9,88 €	eBay	https://www.ebay.de/itm/390967250213?hash=item5b0776cd25:g:Oy4AAOSwMYRfgGgo