

Schlussbericht PV P+D, DIS 37527 / 77266, 03 / 2003

Solgreen

Ein System zur Verbindung von Gründächern mit Photovoltaikanlagen

ausgearbeitet durch:

Peter Toggweiler, Oliver Meichsner

Enecolo AG

Lindhofstrasse 52, CH-8617 Mönchaltorf



Projektname: Solgreen

DIS – Nummer: 37527 / 77266

Projektdauer: 1. April 2000 – 15. März 2003

Finanziert durch: BfE
Bundesamt für Energie

ewz
Elektrizitätswerke Zürich

Projektpartner

Projektpartner:



Enecolo AG
CH - 8617 Mönchaltorf
Tel.: 01 994 90 01
Fax: 01 994 90 05



EPFL-LESO
CH - 1015 Lausanne
Tel.: 021 693 43 41
Fax: 021 693 27 22



Ernst Schweizer Metallbau AG
CH - 8908 Hedingen
Tel.: 01 763 61 11
Fax: 01 761 88 51



Solstis S.à.r.l.
CH - 1004 Lausanne
Tel.: 021 622 50 75
Fax: 021 622 50 71

Inhaltsverzeichnis

<u>Abstract / Zusammenfassung</u>	4
<u>1 Einleitung</u>	6
<u>2 Grundlagen</u>	6
<u>2.1 Spezifikationen</u>	6
<u>2.2 Gründächer</u>	7
<u>2.3 Statik</u>	7
<u>2.3.1 Winddruck</u>	8
<u>2.3.2 Prinzip Nachweis</u>	9
<u>2.4 Material</u>	10
<u>3 Entwürfe und Entwicklungen</u>	12
<u>3.1 Systemaufbau</u>	12
<u>3.2 Lösungsvorschläge</u>	13
<u>3.2.1 Überlegungen der Projektpartner</u>	13
<u>3.2.2 EPFL – Lausanne et Solstis S.a.r.l.</u>	15
<u>3.2.3 Enecolo AG</u>	15
<u>3.3 bisher praktisch umgesetzte Versionen</u>	18
<u>3.3.1 SOLGREEN Large</u>	19
<u>3.3.2 SOLGREEN Small</u>	19
<u>3.3.3 SOLGREEN Alpha/Haie</u>	19
<u>3.3.4 System Ständer/Baum</u>	19
<u>3.3.5 System Schere</u>	20
<u>4 Versuche und Messungen</u>	21
<u>4.1 Ausreissversuch mit Bodenplatte</u>	21
<u>4.2 Windkanalversuch an der FH Köln</u>	22
<u>4.3 Belastungstest der Nietverbindung</u>	22
<u>4.4 Zugversuch am Scherengestell</u>	23
<u>5 Testanlagen</u>	24
<u>5.1 Variante Alpha</u>	24
<u>5.2 Variante „C-Shape“</u>	25
<u>5.3 Variante Ständer</u>	26
<u>6 Pilot- und Demonstrationsanlagen</u>	28
<u>7 Kosten</u>	30
<u>8 Zusammenfassung der Lösungen</u>	33
<u>9 Umsetzung am Markt</u>	34
<u>10 Referenzen</u>	35

Abstract / Zusammenfassung

SOLGREEN is a new mounting structure for pv-modules on green flat roofs. It helps to combine clean solar energy production with environmental friendly roof surfaces.

The goal was to develop a light-weight system, which uses the existing substrate on the roof to withstand the windforces. Thus the structure together with the modules are kept in place by the gravel and the substrate for the roof vegetation. The project team Enecolo AG, EPFL-LESO, Ernst Schweizer Metallbau AG and Solstis S.a.r.l. have developed a new, material saving, athetically pleasing and light-weight mounting structure. The result will be visible on the market with competitive products.

An important design issue was to give a reasonable distance between the roof surface and the lower edge of the modules. This to avoid shading of the lower cells by the vegetation and to increase the time between two maintenance cycles. The proposed distance is in the range of 20 – 30 cm.

A higher structure impedes increased costs and more material is used. The developed products had to be optimised in view of costs. Otherwise such systems would have a niche market character.

The product is available for different inclination angles between 20° and 30° and for most of the available solar modules, either laminates or framed modules. Several pilot- and demonstration-systems have been installed up to now with a power of more than 80 kW_p. The results and the responses from the persons involved are very positive. The combination of PV with roof vegetation works well. Monitoring of the installations in Zurich and Basel over a period of 5 years including windforce-measurements shall prove the quality and proper function of the system and hints for possible improvements.

Central point of interest is the durability and the solidity of the system because it has to withstand heavy windforces over a period of 20 to 30 years at exposed places. Many efforts were made in this area. Another important experience is concerning about the soil substrate and the seeds. They have to be selected carefully because slow and low growing plants should be preferred as well as there shouldn't be too many fertilising components making plants growing too intensive.

SOLGREEN ist eine neue Montagestruktur für PV-Module auf begrünten Flachdächern. Es hilft, saubere Sonnenenergie mit einer bepflanzten, natürlichen Dachhaut zu vereinen.

Die Forderung war, ein leichtgewichtiges System zu entwickeln, welches das auf dem Dach vorhandene Substrat (Kies und Humus) nutzt. Die durch Sturmwinde verursachten Kräfte werden über die spezielle Montagestruktur flächig in den Boden eingeleitet. Dem Projekt-Team, bestehend aus der Enecolo AG, der EPFL-LESO, der Ernst Schweizer Metallbau AG und der Solstis S.a.r.l., ist es gelungen, eine materialsparende, ästhetisch gefällige und leichtgewichtige Art von Montagesystemen für begrünte Flachdächer zu realisieren. Die besten Lösungen dazu werden in Form von wettbewerbsfähigen Produkten auf den Markt kommen.

Zwei wichtige Forderungen waren unter anderem die geeignete Höhe (Bodenfreiheit) über der Substratoberfläche und die unbehinderte Pflege der Dachbegrünung. Beiden Bedingungen sind in den neu vorgeschlagenen Systemen weitgehend erfüllt. Die Bodenfreiheit wurde auf 30 – 40 cm angesetzt und es sind keine vorstehenden Gestellfüsse vorhanden, welche die Schnitarbeiten behindern. Diese Merkmale resultieren in einen gute und eleganten Design für begrünte Flachdächer.

Der Nachteil davon sind geringfügig höhere Kosten (wegen der Höhe über dem Boden) und die verwendeten Materialien. Die entwickelten Produkte mussten deshalb im Hinblick auf die Kosten optimiert sein, damit die Solaranlagen auf Gründächern nicht unverhältnismässig teuer werden.

Weitere Vorteile sind der wählbare Anstellwinkel im Bereich von 10° und 45°, die verschiedenen Arten und Grössen der einsetzbaren Solarmodule und die Wahl der Befestigung von Kleben und Klemmen bis hin zu Schrauben.

Mehrere Pilot- und Demonstrationsanlagen mit einer Gesamtleistung von 84 kW_p wurden bisher installiert. Die Ergebnisse und Rückmeldungen der beteiligten Personen sind sehr positiv. Die Kombination von PV und Gründächern funktioniert gut. Mit Unterstützung vom BFE und der Stadt Basel werden zwei Anlagen in Zürich und Basel über einen Zeitraum von 5 Jahren genauer beobachtet, einschliesslich einer punktuellen Windlastmessung. Damit können mehrere, umfassende Erfahrungen gesammelt und für die weitere Anwendung einem grossen Kreis von Interessierten zugänglich gemacht werden. Zentraler Punkt ist die Gebrauchsdauer und die Festigkeit des Systems über den relativ langen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren zu gewährleisten. In diesem Gebiet wurden viele Untersuchungen zu den einsetzbaren Baumaterialien gemacht. Eine andere wichtige Erfahrung betrifft das Bodensubstrat und die Samen. Sie müssen sorgfältig ausgewählt werden, weil langsam und niedrig wachsende Pflanzen vorgezogen werden sollten genauso wie ein nährstoffarmes Substrat.

Zentraler Punkt ist, die volle Gebrauchsdauer und die Festigkeit des Systems zu gewährleisten, um den Witterungseinflüssen über einen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren an besonders exponierten Orten zu widerstehen. In diesem Gebiet wurden viele Anstrengungen gemacht. Eine andere wichtige Erfahrung betrifft das Bodensubstrat und die Samen. Sie müssen sorgfältig ausgewählt werden. Langsam und niedrig wachsende Pflanzen sind zu bevorzugen und das Bodensubstrat darf nicht zuviel Humus enthalten, damit durch natürliche Selektion auch langfristig die gewünschte Vegetation entsteht und erhalten bleibt.

1 Einleitung

Immer häufiger ist die Kombination von Solarstromanlagen und Flachdachbegrünung erwünscht. Diese Kombination muss nicht unbedingt zu einem Konflikt führen. Im Gegenteil, Lösungen sind entwickelt worden, die ein vorteilhaftes Miteinander ermöglichen. SOLGREEN ist ein Forschungsprojekt, welches sich seit 1997 dieser Entwicklung angenommen hat [1]. Ziel des Projektes ist es, ein Aufständersystem für Photovoltaik-Module auf Gründächern zu entwerfen, welches der festgelegten Spezifikationen entspricht.

Die Projektpartner EPFL-LESO, Solstis Sàrl, Ernst Schweizer Metallbau und Enecolo AG verfolgten teilweise unterschiedliche Ansätze und tauschten in regelmässigen Abständen ihre Erfahrungen aus. Im Laufe der Zeit haben unterschiedliche Konstruktionsvarianten Anwendung gefunden mit dem, Ziel nützliche Informationen für die Weiterentwicklung zu liefern.

Auf den folgenden Seiten wird zusammenfassend über die angesprochene Entwicklungsarbeit und deren Resultate berichtet. Detaillierte Informationen zu einzelnen Themenbereichen, Untersuchungen und Tests befinden sich in den Einzelberichten im Anhang.

2 Grundlagen

2.1 Spezifikationen

Zum Auftakt des Projekts wurden gemeinsam die Spezifikationen bzw. die Anforderungen festgelegt denen das Aufständersystem genügen soll (siehe [2], [3]). Grundlegend wurde die Verwendung des Dachsubstrats als Ballast für die Tragkonstruktion der Anlage beschlossen, um die Dachlast nicht unnötig zu erhöhen. Die Minimierung von Umweltbelastung und Kosten durch sparsamen Materialeinsatz bei der Unterkonstruktion soll die Akzeptanz am Markt gewährleisten. Neben der ästhetischen Integration der Anlage in die Dachbegrünung soll der Lebensraum für Fauna und Flora auf Dachbegrünungen erhalten, bzw. gefördert werden. Die Erhöhung der Bodenfreiheit soll die Module gegen Beschattung durch Pflanzen schützen. Weitere wichtige Kriterien sind:

- Modulanstellwinkel wählbar zwischen 20° und 45°;
- Flexibilität bezüglich der verwendeten Modulgrösse;
- Korrosionsfestigkeit der Werkstoffe im Erdreich und in der Atmosphäre;
- eine einfache Montage;
- eine Gebrauchsdauer grösser 25 Jahre;
- die Einhaltung zutreffender Standards und Normen;

sowie ein wartungsfreier Betrieb und die Verwendung von recyclingfähigen Materialien.

2.2 Gründächer

Das Projekt Solgreen zielt auf flache oder leicht geneigte Dächer ab. Bei der Kombination von Gründach und Photovoltaik können gleichzeitig mehrere ökologische Vorteile genutzt werden, ohne wesentliche Einschränkungen durch die PV-Module. Man muss die beiden Dinge nur sinnvoll kombinieren.

Grundsätzlich hat die Begrünung von Dachflächen folgende Vorteile ([3], Kapitel „Gründächer“, [4]):

- Hoher Wasserrückhalt, der je nach Bauart 50-90% betragen kann. Das Wasser verdunstet, wird durch die Pflanzen verbraucht bzw. fließt zeitverzögert ab und so wird die Kanalisation entlastet.
- Klimaverbesserung durch Abkühlen und Befeuchten der Luft. Das wirkt sich besonders auf die angrenzenden Wohn- und Büroräume aus. Bei grossen Dachflächen ergeben sich Auswirkungen auf die weitere Umgebung.
- Bindung von Staub und Schadstoffen von ca. 10-20% aus der Luft. Auch Nitrate und andere in der Luft und den Niederschlägen enthaltene Stoffe werden festgehalten und verwertet.
- Verlängerung der Dachlebensdauer, da die Begrünung vor UV-Strahlung, Hagelschlag, Hitze und Kälte schützt. Zusätzlich wird die Wärmeausdehnung und –kontraktion in Grenzen gehalten.
- Erhöhter Schallschutz durch weniger Schalreflexion nach aussen um 3dB und verbesserte Schalldämmung eines Daches um bis zu 8 dB. Diese Vorteile kommen bei Bauwerken zum Tragen, die z.B. in Einflugschneisen liegen.
- Zusätzliche Wärmedämmung, die inzwischen auch bei bestimmten Begrünungssystemen ganz offiziell angerechnet werden darf.
- zusätzlicher Lebensraum für Tiere und Pflanzen.

2.3 Statik

Bei der statischen Dimensionierung der Ständerkonstruktion gibt es verschiedene Arten der Belastung, die berücksichtigt werden müssen. [3] So wird die Konstruktion neben dem Eigengewicht des Moduls durch sich darauf ablagerndem Schnee, sowie durch Winddruck und –sog belastet.

Richtwerte zur Einschätzung dieser Lasten liefert auf nationaler Ebene die **SIA 160** für Wind- und Schneelasten, bzw. die **DIN 1055 T4** und **DIN 4131 (Antennenanlagen)** für die Windlast sowie die **DIN 1055 T5** für Schneelasten.

Auf europäischer Ebene gibt es die Bestrebung, die bestehenden nationalen Bestimmungen anzugleichen. Da man sich hier noch nicht endgültig geeinigt hat, gibt es sogenannte „Europäische Vornormen“, abgekürzt ENV. Die Wind- und Schneelasten betreffenden Normen heissen **ENV 1991 2-4 und 1995**.

Eine weitere wichtige Norm ist die **IEC 61215**, die direkt für das „design qualification and type approval“ gilt. Die Hersteller von PV-Modulen testen ihre Anlagen vor allem nach diesem Standard („ISPR-Test“).

Zum Zustandekommen der einzelnen Kräfte:

Die Belastung über das Gewicht des Schnees im Winter wird in den Normen unterschiedlich eingeteilt nach Höhe über dem Meer, geographischer Lage, örtlichen Gegebenheiten, die Schneeverwehungen begünstigen und der durchschnittlichen Schneeliegedauer am Ort.

Dieses ergibt eine anzunehmende Schneehöhe (inklusive Sicherheitsfaktor) über eine bestimmte Zeit.

Bei der Berechnung der Windlast ist es ähnlich. Es gibt einerseits die Belastung der PV-Anlage auf Druck und Zug durch An- und Hinterströmung des Gestells und des Moduls. Andererseits gibt es auf Dächern eine Sogwirkung des das Gebäude umströmenden Windes. Das kommt daher, dass das Gebäude den Wind einerseits umleitet und andererseits auch eine Querschnittsverkleinerung der für den Wind zur Verfügung stehenden Fläche darstellt. Nach dem Bernoullischen Gesetz folgt daraus eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, die die Wirkung auf die Anlage verstärkt. Durch das Umleiten des Windes entstehen Bereiche auf dem Dach, die „im Windschatten“ liegen, wo also ein Unterdruck herrscht und daher eine Sogwirkung nach oben eintritt. Zum Anderen gibt es an den Gebäudeecken und –kanten Bereiche mit starker Wirbelbildung. Hier ist die Belastung 2-3 mal so hoch, als in der Mitte des Daches anzunehmen.

Bei der Berechnung der Schnee und der Windlast stellt man fest, dass im Normal die Belastung durch Druck oder Sog durch den Wind stärker ist. Die Belastung durch Schnee wird vernachlässigt, auch mit der Begründung, dass starker Wind den Schnee von den Modulen herunterweht, so dass dieser nicht mehr auf die Module drückt.

2.3.1 Winddruck

Bei der Winddruckberechnung betrachtet man den Druck, den der Wind aufgrund seiner Geschwindigkeit auf ein Hindernis ausübt (siehe [3], Kapitel „Windlast“, [5]). Man spricht auch vom „dynamischen Druck“ oder auch „Staudruck“. Dieser wird berechnet über

$$p_{\text{dyn}} = \rho / 2 \times v^2$$

Für den zu erwartenden Wind in einer bestimmten Höhe muss man noch einen Beiwert $c_e(z_e)$ multiplizieren. Für vom Wind angeströmte Körper gilt zudem, dass man die Gleichung um den aerodynamischen Beiwert c_w erweitern muss. Man erhält also für den zu berücksichtigenden Winddruck w die Formel:

$$w = p_{\text{dyn}} \times c_e(z_e) \times c_w$$

wobei $p_{\text{dyn}} = \rho/2 \times v_{\text{ref}}^2 = 462.4 \text{ N/m}^2$ mit: $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ (Dichte der Luft)
 $v_{\text{ref}} = 27,2 \text{ m/s}$ (Windgeschwindigkeit)

$c_e(25) = 2.5$ (Beiwert für eine Gebäudehöhe von 25 m)

$c_e(50) = 3.0$ (Beiwert für eine Gebäudehöhe von 50 m)

$c_w = -1.2$ (aerodynamischer Beiwert)

Dabei bedeutet ein negativer c_w -Wert eine Sogwirkung nach oben und ein positiver Wert eine Druckwirkung nach unten. Der Wert gilt für eine Reihe von Modulen, die nebeneinander stehen und wo dann die Länge der Reihe ca. 5 mal so gross ist, wie die Modulhöhe.

somit ergibt sich nach der ENV 1991 2-4 und 1995 für die Schweiz, in der obige angenommene Windgeschwindigkeit ausser in den Föntälern als Grundlage gilt, ein Winddruck von:

$$w_{\text{basis}} = -1390 \text{ N/m}^2$$

$$w_{\text{verstärkt}} = -1665 \text{ N/m}^2$$

Der höhere Wert gilt für Gebäude zwischen 25 und 50 m bzw. für niedrigere Gebäude in besonders dem Wind ausgesetzten Lagen.

2.3.2 Prinzip Nachweis

Um nachzuweisen, dass ein Tragwerk oder eine Gestellkonstruktion den möglichen Belastungen standhält, so dass sie ihren Nutzen bringen kann und auch keine Gefahr darstellt, muss man folgende Abschätzung machen und dafür sorgen, dass sie erfüllt wird: [5]

$$\text{Summe Einwirkungen} \times \text{jeweiliger Teilsicherheitswert} \leq \text{Widerstand} \times \text{Widerstandsbeiwert}$$

Dabei sind beispielsweise:

Einwirkungen: Wind, Eigengewicht, Auflasten etc....

Teilsicherheitsbeiwerte:	Sicherheit auf Einwirkungsseite z.B.: „30ig-jähriger Wind“
Widerstand:	Widerstand eines Profils, Auflagers etc...
Widerstandsbeiwert:	Sicherheit auf Widerstandsseite: Toleranzen bei Profilen etc...

Die sich ergebenden Belastungen, die man bei der Auslegung der Komponenten und Befestigungen seiner Anlage annehmen muss, weichen dabei stark voneinander ab, je nachdem, welche Norm man zugrundelegt [6]. Um dabei einen Überblick zu bekommen, sollen hier ein paar Werte aufgelistet werden, für eine Anlage, die sich auf einem Flachdach, maximal 50 m hoch, nicht in besonders dem Wind ausgesetzter Lage in einer Höhe von bis 1000 m üNN befindet:

1. Erfahrungswerte Enecolo AG:	1 kN/m²	1,5 kN/m² am Dachrand
2. nach DIN 1055 T4:	1,21 kN/m²	
3. nach SIA 160:	1,41 kN/m²	
4. nach DIN 4131 (Staudruckzone 3)	1,47 kN/m²	
5. nach ENV 1991 2-4, 1995	1,67 kN/m²	(siehe oben)
6. nach IEC („Ispra-Test“)	2,40 kN/m²	(gültig für alle Anwendungen)

2.4 Material

Der Anspruch auf Reduktion der Herstellungskosten und der Optimierung bzgl. Fertigung und Logistik legt es nahe, auf gängige, bewährte und unkompliziert zu handhabende Werkstoffe zurück zu greifen. Die bisherigen Untersuchungen zum Thema Solarstromanlagen auf Gründächern haben bereits die Möglichkeit des Einsatzes einer Vielzahl verschiedener Materialien aufgezeigt und die Eigenschaften dieser Materialien beleuchtet. Es wird deshalb vorausgesetzt, dass die grundlegenden Eigenschaften und Fertigungsverfahren von Werkstoffen wie Stahl, Aluminium, Beton, Holz sowie der gängigsten Kunststoffe - zumindest ihrer Hauptgruppen - bekannt sind (siehe [3], Kapitel „Materialien“).

Deshalb wird im folgenden nur auf Besonderheiten - z.B. im Bezug auf Korrosion/Korrosionsschutz - eingegangen.

Das wichtigste Kriterium bei der Materialwahl ist die ausreichende Korrosionsbeständigkeit bzw. die Möglichkeit eines effektiven Korrosionsschutzes und damit die Haltbarkeit der Konstruktion. Es ist leicht vorstellbar, dass ein „Abräumen“ des Daches wegen übermäßiger Korrosion der Montageeinrichtung (Demontage der Module, entfernen der Vegetationsschicht, ausgraben der Montagegestelle usw.) zum sofortigen wirtschaftlichen „Tod“ der Anlage führen würde, so dass die Forderung nach einer Mindestlebensdauer von 25 Jahren unbedingt erfüllt werden muss.

Zur Beurteilung der zu erwartenden Lebensdauer muss erst einmal die Art der korrosiven Belastung möglichst genau bestimmt werden.

Wichtig, im Hinblick auf das Langzeitverhalten von Werkstoffen, ist die Tatsache dass Korrosionsvorgänge irreversible, freiwillige Naturvorgänge sind die, i.d.R., nicht vollständig unterbunden, sondern nur in ihrer Geschwindigkeit beeinflusst werden können. Beim Korrodieren kann es zu unterschiedlichen Systembeeinflussungen kommen [IKS Dresden]:

- Äußere Abtragungen des Werkstoffs
- Versprödung des Werkstoffs
- Rissbildung
- Verunreinigungen („Rostwasser“)
- Oberflächenveränderungen (Rosthaut, Aufrauung, Verfärbung)
- Festsetzen von Teilen.

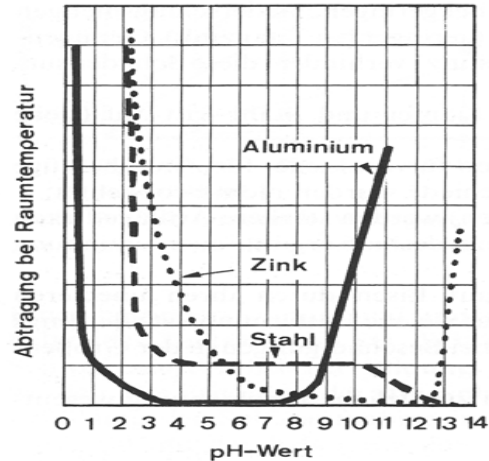


Abbildung 1: Verhalten verschiedener Materialien bei unterschiedlichem pH-Wert

Art und Intensität der Korrosion sind stark abhängig vom korrodierenden Medium. Die hier untersuchte Konstruktion wird im Freien aufgestellt sein und ist dabei im Boden verankert. Es werden deshalb nur die Besonderheiten der atmosphärischen und der Bodenkorrosion betrachtet. Wie man an der Abbildung sehen kann, kommen bei den Befestigungspunkten, die im Boden liegen aufgrund des eher etwas saureren Mediums Humus die Materialien Aluminium und Edelstahl zur Verwendung, während über dem Boden auch der günstigere feuerverzinkte Stahl verwendet werden kann.

Generell kann auch versucht werden, pH-Wert vom Substrat im Bereich über 7 zu halten, damit Metallteile im Boden nicht zu stark korrodieren. Dadurch könnte man auch feuerverzinkte Bauteile im Boden verwenden. Eine andauernde Behandlung des Bodens könnte jedoch viel kostenaufwändiger sein als die resistenteren Materialien und wäre den natürlichen Gegebenheiten nicht gerecht.

3 Entwürfe und Entwicklungen

3.1 Systemaufbau

(siehe [3])

Die Solarmodule müssen genügend Abstand zum Boden (30-40 cm an der Vorderkante) haben, damit die Dachvegetation sich genügend entwickeln kann, die Module jedoch nicht verschattet und die Grünflächenpflege einfach durchzuführen ist. Ausserdem müssen die Solarmodule hauptsächlich gegen Wind gut verankert werden, ohne eine schwere zusätzliche Dachlast (Betonsockel, ect.) zu benötigen, was die Eigenschaften des Gründaches beeinträchtigen würde.

Der Lösungsansatz lag in den Parallelen zwischen den ausgestellten erhöhten Solarmodulen und den Krafteinwirkungen auf einen Baum im Wind (siehe [3], Kapitel „Lösungsansätze“).

Ein zentraler Augenmerk galt den Mechanismen der Foundation oder der Verankerung der PV-Module durch das auf Gründächern eingesetzte Bodensubstrat.

Verschiedene Tests und Pilotprojekte, die Aufschluss über Ausreisskriterien, Betriebslasten, Windbelastungen und Handhabung bei der Montage gaben, führten zu mehreren SOLGREEN-Varianten. Alle sind in der Grundidee gleich, aber im spezifischen Design unterschiedlich.

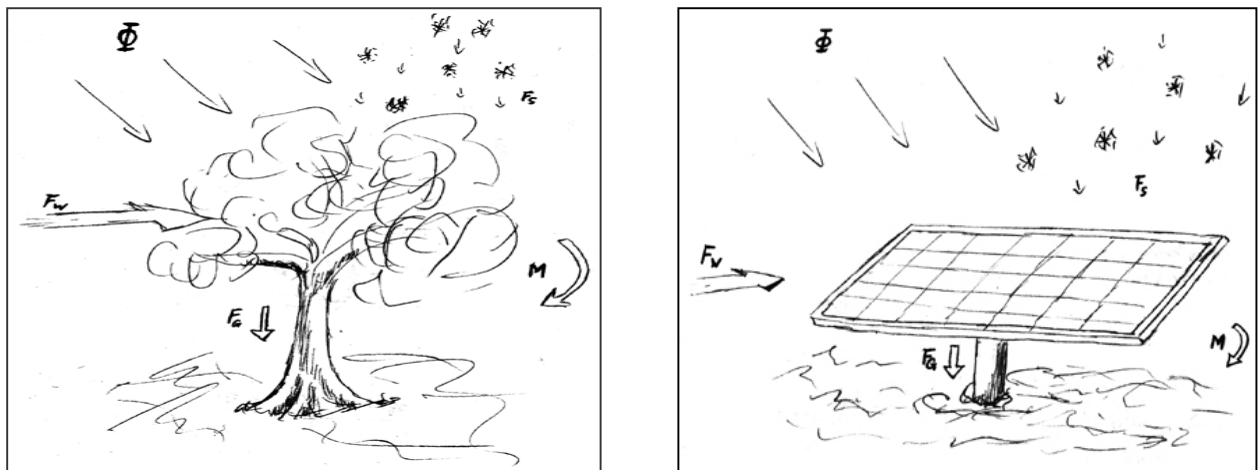


Abbildung 2: Erste Gedanken zur Analogie eines Gestells zu einem Baum

Grundsätzlich dient eine Kunststoffplatte aus recycelten Kunststoffen (PE) als Basis, die durch das Bodensubstrat beschwert und auf das Dach gedrückt wird. Auf diese Platte wird das Gestell (Modulträger) befestigt. Es werden zwei Varianten von Grundkonstruktionen für möglich gehalten, die beide vier Eigenschaften erfüllen müssen:

- Mechanischer Schutz auf der Dachisolation, Dachhaut
- Ablauf des Regenwassers
- Verankerung und Befestigungen der Solarmodule
- Geringe zusätzliche Dachlast

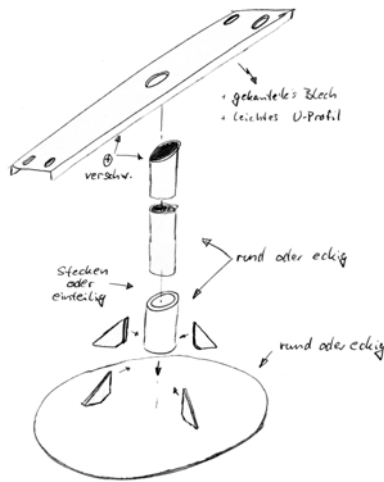


Abbildung 3: Idee „Schirmständer“

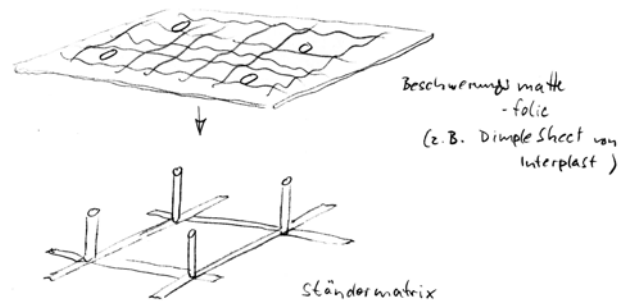


Abbildung 4: Idee „Matte“

Beide Ideen stellten unterschiedliche Ansätze bei der Fundation dar. Zum einen galt es das Konzept mit dem Prinzip 'Schirmständer' weiter zu verfolgen zum anderen aber auch die Möglichkeiten bei der Befestigung des Gestells an der Platte zu untersuchen. Dies führte zu konkreten Lösungsansätzen. Die Idee der Ständermatrix, wie in Bild 4, wurde im Materialaufwand als zu hoch eingeschätzt und fallen gelassen.

Das Hauptaugenmerk war auf die einfache Realisierbarkeit gelegt, da sich das System in Zukunft in einem sehr engen Markt bewegen wird und daher kostengünstig sein muss.

3.2 Lösungsvorschläge

3.2.1 Überlegungen der Projektpartner

Grundsätzlich will man vermeiden, zusätzliche Lasten auf das Dach zu bringen. Daher versucht man, die Unterkonstruktionen mit dem benötigten Humus und Kies zu beschweren und durch das Gewicht und der Verwurzelungen der Pflanzen beim Gründach auf dem Dach zu verankern. Das Gewicht des Substrates ist keine zusätzliche Dachlast, da es sowieso verwendet würde, um die empfindliche Dachhaut zu schützen.

Dabei kam man auf die Idee, eine Kunststoffplatte der Firma Deltatec® AG, Zürich, einzusetzen. Die vorgeschlagene Platte ist im Bauwesen als Schutz- und Sickerplatte sehr weit verbreitet im Einsatz. Sie besteht aus recycelten PE und zeichnet sich durch einen günstigen Preis aus.

Die Deltatec®-Platte wird auf die Wurzelschutzschicht über der eigentlichen Dachhaut eines Flachdaches gelegt und mit dem Kies und/oder Humus beschwert.

Die belastete Deltatec®-Platte eignet sich für gerahmte und ungerahmte Solarmodule von 0.5 bis ca. 1.5 m Seitenlänge.

Der Dachaufbau bleibt gleich, wie beim Gründach üblich.

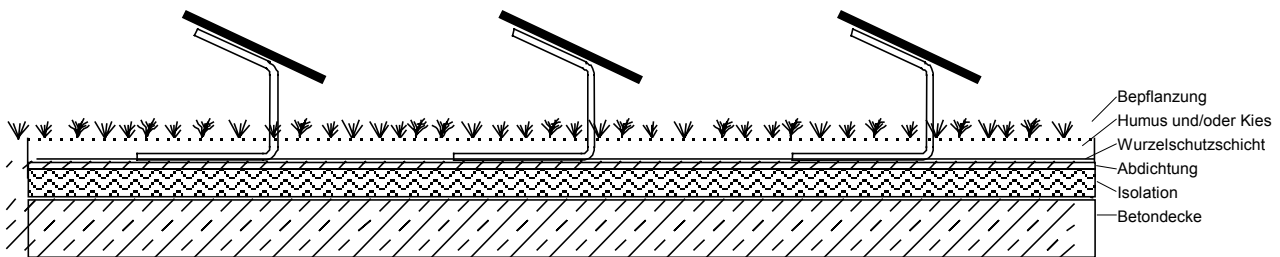


Abbildung 5: verschiedene Schichten des Dachaufbaus; auf den Gestellbeinen liegen die Deltatec®-Platten, die mit Kies und Humus beschwert sind

Die Montage verläuft wie folgt:

- Flachdach mit Isolation und Wasserdichtung
- Nahtloses verlegen der Wurzelschutzfolie
- Deltatec®-Platten (Typ Replast) verlegen
- Substrat (Kies und Humus) verteilen, ev. inkl. Samen
- Montage der Stützen für die Module
- Montage der Solarmodule

Bei der Auswahl der Bepflanzung hat man auf die Verwendung von niedrig wachsenden Pflanzen zu achten. Ausserdem muss man berücksichtigen, dass der Boden während der Sommermonate sehr trocken sein kann. Teilweise ist es ratsam, den Boden an manchen Stellen anzuhäufen, damit sich im Inneren des niedrigen Walles ein wenig Feuchtigkeit sammeln kann und einen gewissen Rückzugsort für die Pflanzen und Kleintiere darstellt. Natürlich dürfen die Wälle und die auf ihnen eventuell etwas höher wachsenden Pflanzen die PV-Module im Tagesverlauf nicht beschatten. Diesem kann man aber mit einer umsichtigen Gestaltung der Dachfläche aus dem Wege gehen. Bei der Symbiose zwischen Solarstromerzeugung und Gründachnutzung muss man dabei auf beiden Seiten Kompromisse eingehen.

Des weiteren kann man später ein unterschiedliches Wachstum der Pflanzen auf dem Dach feststellen. Unter bzw. von der Sonne aus gesehen hinter den PV-Modulen wachsen eher Pflanzen, die mehr den Schatten lieben. Vor den Modulen wachsen eher sonnenliebende Pflanzen, die auch davon profitieren, dass das Regenwasser auf dieser Seite durch die Schrägstellung der Glasfläche abfließt.

Den Erfahrungen der Projektpartner nach reicht es aus, die Dachfläche ein- bis maximal zweimal im Jahr zu pflegen durch Mähen bzw. Ausreissen von zu üppig wachsenden Pflanzen.

Eine noch unbestätigte Eigenschaft der Begrünung rund um die PV-Module könnte eine zusätzliche Kühlung der Solargeneratoren durch die Verdunstung der Feuchtigkeit in den Pflanzen sein. Das führt zu einer höheren Energieausbeute bei der Solarstromgewinnung, weil der Innenwiderstand der Solarmodule gesenkt wird. Entsprechende Vermutungen werden von den Betreibern der Photovoltaikanlage auf dem Dach der Messe Basel gemacht.

3.2.2 EPFL – Lausanne et Solstis S.a.r.l.

(siehe [7], [8], [9])

An der EPFL in Lausanne machte man sich Gedanken, ein optimales Profil zu gestalten, dass die schnelle und sichere Befestigung an der Bodenplatte ermöglicht. Später sollte es dann möglich sein, auf diese Ständer das bekannte Solface-Profil zu montieren, dass die ungerahmten PV-Module trägt und an das sie mittels Klammern befestigt werden können.

Dabei ergaben sich zwei Varianten:

Der „Heuschlitten“, der aus zwei gebogenen Profilen besteht, die unten an die Deltatec®-Platte genietet sind, und die Variante „Tisch“ mit 4 Stützbeinen, die unten auf die Bodenplatte montiert sind und an deren oberen Enden wiederum über Winkel das Solface-Profil befestigt werden sollte. Während beim „Heuschlitten“ die Anzahl der benötigten Teile auf ein Minimum reduziert wurde, hatten beide den Vorteil, kleiner und besser zu transportieren zu sein als vorhergehende Versionen. Sie waren auch vorfertigbar, um die Montagezeit auf dem Dach zu minimieren.

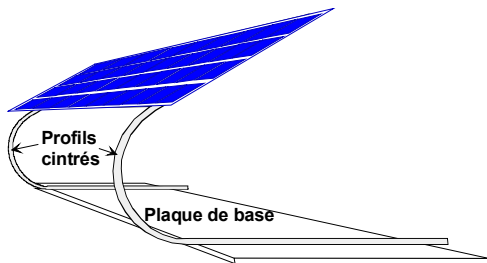


Abbildung 6: Variante „Heuschlitten“

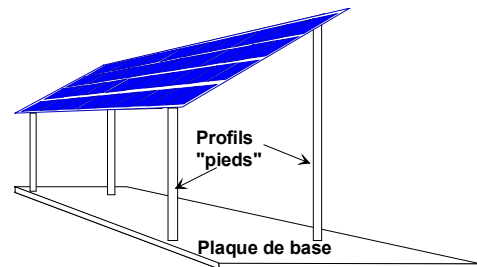


Abbildung 7: Variante „Tisch“

Aus der Version „Heuschlitten“ entwickelte sich später die Lösung „C-Shape“ für gerahmte PV-Module.

3.2.3 Enecolo AG

(siehe [3], [10], [11], [12])

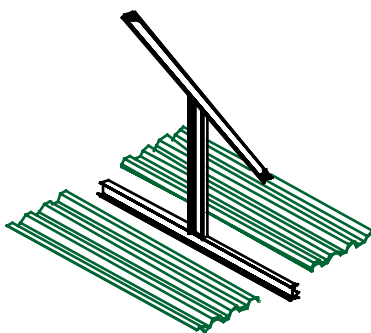


Abbildung 8: Konstruktion M. Benner

Bei der Enecolo AG wurde ein Lösungsvorschlag weiterentwickelt und in einer PV-Anlage für die EKZ-Solarstrombörse in Einsiedeln eingesetzt.

Die Konstruktion bestand aus Deltatec®-Platten, welche in einen I-Träger geschoben werden. Auf den I-Träger wird eine speziell gefertigte Metallstütze aus U-Profilen verschraubt. Das vorhandene Dachkies wird auf die Platten verteilt und dient zur Beschwerung. Die Module werden über Z-Profile, welche horizontal auf den Metallstützen verschraubt werden, montiert.

Das System wurde mit Erfolg und wichtigen Erfahrungen in einer 30 kW PV-Anlage in Einsiedeln angewendet. Es resultierten wertvolle Rückmeldungen seitens des Installateurs und die Enecolo AG erarbeitete Weiterentwicklungen.

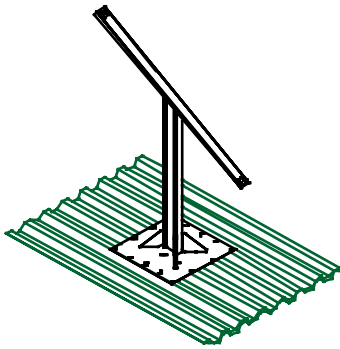


Abbildung 9: Konstruktion Fuss

Eine parallele Bearbeitung führte zu anderen Ansätzen, wie zum Beispiel in Bild 9 dargestellt. Die Befestigung der Bodenplatte erfolgt von oben direkt mit Nieten, geklebt oder mit Schrauben. Bevorzugt werden Nieten wegen der schnelleren Montage. Sie wurden einem Zugversuch bei der Firma Schweizer unterworfen (s. Bild 21). Das System muss auch wieder im Verbund mit den Deltatec®-Platten verlegt werden. Der Nachteil liegt bei der aufwendigen, teureren Fusskonstruktion, welche geschweisst wird.

Die ersten Erfahrungen (Wasgenring) zeigen, dass es ein grosser Vorteil ist, wenn direkt von oben die Verbindung erfolgt, ohne welche Arbeiten auf der Rückseite der Deltatec®-Platten auszuführen. Die Platten werden auf dem Vlies vorgängig verlegt und das Substrat kann direkt aufgeschüttet werden. Die Ständer werden dann nachfolgend befestigt, mit dem Zusatzaufwand, dass das Substrat in den Reihen wieder entfernt werden muss. Dafür kann das Substratauffüllen ohne Behinderung erfolgen und die Reihen sind nach der Montage korrekt ausgerichtet.

Zusammen mit der Ernst Schweizer AG machte man sich viele Gedanken über das Design des Metallständers. Hierzu sind verschiedene Lösungsansätze vorhanden, sei es als einbeinige Stütze oder Scherensystem. Nachfolgende Zeichnungen zeigen zwei Konstruktionsvorschläge.

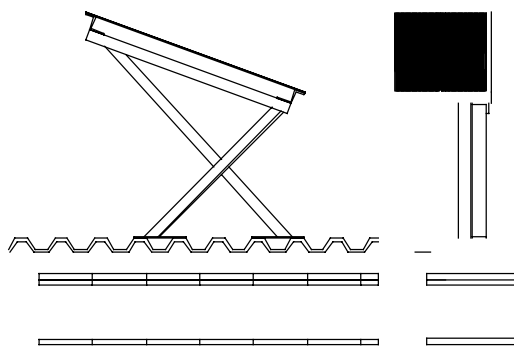


Bild 10: System Schere

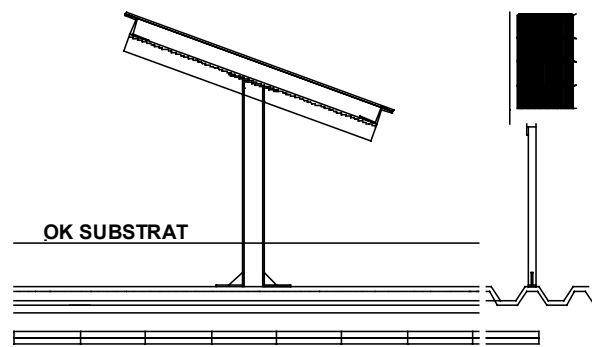


Bild 11: System Baum

(Bei jedem Bild stellt die linke Ansicht der Seitenschnitt dar und die rechte die Frontansicht.)

Der einbeinige Ständer ist durch seine Schweisskonstruktion teurer als das Scherengestell. Die Ständerversion kostet pro Einheit ca. 34,- SFr. und die Scherenversion ca. 28,50 SFr..

Die Version „Baum“ wurde in der Testanlage Lindhof im kleinen ausprobiert und die Version „Schere“ in der Anlage „Kraftwerk 1“ bei 25kW realisiert.

Aufgrund der Erfahrungen, die aus den bisher erstellten Anlagen, besonders der Anlage „Kraftwerk 1“ und der näheren Betrachtung des Scherengestells herrührten, wurden im Jahr 2002 teilweise Modifizierungen beim Gestell sowie neue Formen von Profilen und Verbindungsarten realisiert.

Grundlegendes Ziel hierbei ist, die Einfachheit und Dauerhaftigkeit der Montage zu verbessern, möglichst flexibles Ausrichten und Verschieben der Komponenten untereinander zu ermöglichen und jede Komponente auf ihren Zweck hin zu optimieren, d.h. klare Aufgabentrennung der einzelnen Teile herzustellen. Diese Gliedern sich wie folgt:

1. Ein Rahmensystem bestehend aus Horizontal- und Vertikalprofil, die gegeneinander verschoben und befestigt werden können. Das Horizontalprofil verbindet dabei die einzelnen Gestelle miteinander.
2. Auf dieses Profil kommt das Vertikalprofil, dass mit einer Schraub-Klemm-Verbindung über zwei Druckplatten pro Verbindungsstelle gehalten wird. Dieses Profil hat mehrere Eigenschaften:
 - Es hat Gummilippen in der Auflagefläche der Lamine.
 - Es hat einen Gewindekanal, so dass an beliebiger Stelle Schrauben eingedreht werden können, die über Kunststoffklötze die Lamine an das Profil drücken.
 - Es hat stirnseitig vorbereitete Schraublöcher, so dass zusätzliche Halteleisten angeschraubt werden können, die die Lamine festhalten.
3. Das Prinzip der Schraub-Klemm-Verbindung ermöglicht eine frei einstellbare und flächige feste Verbindung zweier Bauteile. Jedoch wird auch erwogen, handelsübliche C-Profile mit Langlöchern auf der Rückseite zusammen mit Nutsteinen zu verwenden, da man dann nur eine Schraube pro Verbindung benötigt und über die Langlöcher immer noch in begrenztem Rahmen die Profile untereinander verschieben kann.
4. Eine weitere Veränderung betrifft den Gestellfuss: Man möchte das Gestell wieder von oben auf die Deltatec®-Platte schrauben, so dass das einzelne Gestell eine seitliche Stabilität innehat. Eine günstige Variante wäre, wenn man an den entsprechenden Stellen die Platte bohrt und von unten Einschlagmuttern mit dem Hammer in den weichen Kunststoff treibt. Von oben können dann die vorbereiteten Gestellbeine aufgesetzt und festgeschraubt werden. Dabei ist es möglich, Höhendifferenzen der Gestelle untereinander, wie sie auf einem Dach in einer langen Reihe üblich sind, durch Unterlegplatten, vorzugsweise aus Aluminium, auszugleichen.

Das Problem, eine plane Fläche am Gestell zu bekommen, an der es möglich ist, es an der Kunststoffplatte bzw. an dem Horizontalprofil festzuschrauben, ist durch einfaches Anieten von kleinen Winkeln von ca. 30x30 mm und einer Breite von ca. 40 mm zu lösen. Die Nietverbindung ist noch ein wenig mit einer Zange verdrehbar für die genaue Einstellung des Winkels zur jeweiligen anderen Komponente aber fest genug, um eine stabile Verbindung zu gewährleisten. An den Gestellfüßen werden die Winkel jeweils so angebracht, dass die Schraublöcher in einer Flucht mit den Sicken liegen. So wird ein Verdrehen der Gestelle bei der Montage verhindert.

Zusammenfassend kann man sagen, dass man bei weiterer Optimierung des Scherengestells und einem Profilsystem die Kosten, die bei der Anlage „Kraftwerk 1“ bei 1,31SFr./W lagen, sicher in naher Zukunft unterbieten kann, und das aus folgenden Gründen:

- Es wird die Querstrebe eingespart.
- Ein Verschieben der Profile gegeneinander ermöglicht ein schnelles und einfaches Ausrichten und spart daher Montagezeit.
- Die seitliche Stabilität jedes einzelnen Gestells ermöglicht eine schnellere Montage.
- Die Lösung mit der Einschlag- oder Einpressmutter in die Deltatec®-Platte spart die vorgestanzte Edelstahlplatte ein. Sie kostet viel weniger und ist viel schneller angebracht. (Einmal Einschlagen gegenüber zweimal Nieten!)
- Die Lösung mit den angenieteten Winkeln ist flexibel für verschiedene Winkel (20°, 30°, etc.), so dass man für verschiedene Modulgrößen einfach nur die Länge des Winkeleisens variieren muss, eventuell noch die Position des Schraubloches im Kreuzungspunkt, mehr nicht.

3.3 bisher praktisch umgesetzte Versionen

(siehe [13], [14], [15])

Für eine Konkurrenzfähigkeit auf dem noch kleinen Solar-Markt muss eine einfache Realisierbarkeit vorliegen. Das Produkt kann anfänglich nur durch Kleinproduktionsserien auf den Markt gelangen und sich nicht durch eine economy of scale behaupten. Das heisst, die Material-, Produktions- und Installationskosten müssen möglichst tief gehalten werden. Benötigte Urformen oder Matrizen können mit ihren Kosten nur auf kleine Stückzahlen umgelegt werden und fallen dadurch sehr ins Gewicht. Mit dem Ziel zur deutlichen Preisreduktion wurden verschiedene Möglichkeiten zum Einsatz von preisgünstigen Konstruktionswerkstoffen und neuen Ideen in der Gestaltung gemacht. Alle Varianten weisen einen Winkel des PV-Moduls von 20°-30° zur Horizontalen auf. Auf den nächsten Seiten wird die Entwicklung der Modulträger bildlich und mit Angaben materieller und technischer Art dokumentiert.

3.3.1 SOLGREEN Large

- Foundation: PE-Wanne aus recyklierten Kunststoffen (speziell für SOLGREEN angefertigt)
- Modulträger: gebogener Chromstahl INOX
- Befestigung: in Fussstütze der Wanne hineingestellt

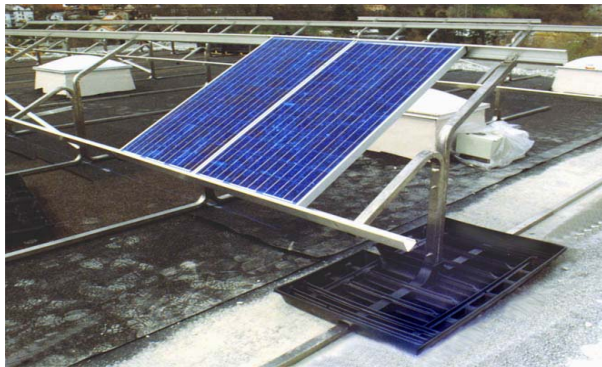


Abbildung 12: Solgreen Large

3.3.2 SOLGREEN Small

- Foundation: die selbe PE-Wanne wie SOLGREEN Large
- Modulträger: gebogener Chromstahl (INOX)
- Befestigung: unter Wanne gelegt und durch dessen Eigengewicht (Substrat)



Abbildung 13: Solgreen Small

3.3.3 SOLGREEN Alpha/Haie

- Foundation: Deltatec®-Platte aus recyceltem Kunststoff (PE); im Bauwesen stark akzeptiert
- Modulträger: zugeschnittene Deltatec®-Platten
- Befestigung: seitlich mit L-Profil verschraubt



Abbildung 14: Solgreen Alpha

3.3.4 System Ständer/Baum

- Foundation: Deltatec®-Platte
- Modulträger: verschweisste, verzinkte U-Profile
- Befestigung: Fussplatte von oben direkt mit Nieten



Abbildung 15: System Ständer

3.3.5 System Schere

- Foundation: Deltatec®-Platte
- Modulträger: verschraubte L-Profile
- Befestigung: 2 Metallplatten auf Kunststoffplatte genietet; Gestell anschließend in Metallplatte gesteckt



Abbildung 16: System Schere

Schon in der Rohbauphase, wenn die Dachhaut und das Schutzflies verlegt worden sind, müssen die Platten ausgelegt werden. So hat man eine freie Fläche und kann sie gut ausrichten. In diesem Fall der Anlage „Kraftwerk 1“ wurden die Metallplatten in einem Abstand von ca. 0,8 m auf die Deltatec®-Platten genietet. Das ist dann später auch der Abstand der Scherenbeine voneinander.



Abbildung 17: Ausgelegte Deltatec®-Platten

4 Versuche und Messungen

Um die Ideen immer mit der Wirklichkeit zu vergleichen, wurden im Laufe des Entwicklungsprozesses verschiedene Versuche durchgeführt. Sie dienten dazu, nachzuprüfen, ob man auf dem richtigen Weg war oder ob man grundlegende Änderungen vornehmen musste. Im einzelnen waren das die Versuche:

- Ausreissversuch mit der Bodenplatte von M. Benner zur Überprüfung der Standfestigkeit des Systems eines Ständers verbunden mit einer beschwerten Bodenplatte
- Windkanalversuche an der FH Köln von M. Benner
- Belastungstest der Nietenverbindung durch die Fa. Ernst Schweizer Metallbau AG
- Zugversuch am Scherengestell von O. Meichsner über deren Verhalten bei Belastung

4.1 Ausreissversuch mit Bodenplatte

Ein erster Prototyp (System Baum) wurde bei der Firma Enecolo AG installiert und Zugversuchen ausgesetzt ([3], Kapitel „Belastungsversuch an einem Prototypen“) Die Deltatec®-Platte mit dem aufgenieteten Metallrohr wurde in ein Erdloch gesetzt und mit 4 cm Kies bedeckt. Darüber wurde ein Holzgestell aufgebaut, mit dem es über Umlenkrollen und Wassertank möglich war, eine Zugbelastung auf die ganze Anordnung zu simulieren. Der Messverlauf wurde protokolliert und mit Fotos dokumentiert.



Abbildung 18: System Baum



Abbildung 19: Anordnung Zugversuch

Die Resultate ergaben, dass die mit Kies und/oder Humus beschwerten Deltatec®-Platte als Verankerung verwendbar sind. Es wurde beobachtet, dass die Platte sich unter hoher Belastung aufwölbt bzw. dass Schüttgut sie von den Seiten her unterläuft. Man hatte dadurch nachprüfbar Ergebnisse über die Standsicherheit und Belastbarkeit der Unterkonstruktion gewonnen.

4.2 Windkanalversuch an der FH Köln

Im Rahmen seiner Diplomarbeit hat sich Michael Benner auch mit der Belastung durch Schnee und Wind, denen die Module ausgesetzt sind, beschäftigt ([3], Kapitel „Windkanaluntersuchung“). Er versuchte, bessere Daten über das Verhalten von Körpern (wie Solarmodule) unter verschiedenen Anstellwinkeln zu erhalten. Als wichtige Ergebnisse erhielt er die Verifizierung von Daten aus der Literatur über den Luftwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von Modulhöhe und Modulreihenlänge sowie die Minimierung des Luftwiderstandes der Gesamtanlage durch Einhalten eines bestimmten Reihenabstandes, der zwischen dem Einfachen und Zweifachen der Modulhöhe liegt.

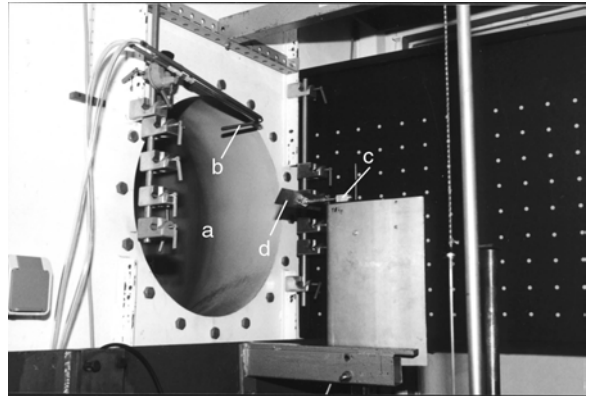


Abbildung 20: Die Versuchsanlage: Man erkennt u.a. Wägezelle (c) und Modulmodell (d)

4.3 Belastungstest der Nietverbindung

Es wurde als gut befunden, wenn eine Tragkonstruktion der PV-Module von oben auf die Deltatec®-Platten montiert werden könnte. Die Lösung mittels einer Nietverbindung lag daher auf der Hand, musste aber auf die bestimmten Anforderungen hin überprüft werden. Bei der Auswahl musste man eine mögliche verstärkte Korrosion in der humiden Umgebung beachten sowie die möglichen auf sie einwirkenden Kräfte im Blick haben.



Abbildung 21: Belastungsversuch

Das Bild zeigt die enorme Belastung bei 240 kg, die auf nur zwei Nieten (Durchmesser 6 mm) einwirkt.

Die Verbindung erfüllt die gestellten Anforderungen und wird bei der Weiterentwicklung der Konstruktion als Basis verwendet.

4.4 Zugversuch am Scherengestell

Zur Überprüfung der Stabilität der Steckverbindung beim Scherengestell wurde dieser Versuch durchgeführt. [16] Der Vorteil und Grundgedanke bei der Stecklösung ist eine schnelle Montage, die ohne Werkzeug erfolgen kann. 5 Gestelle wurden auf eine Deltatec®-Platte montiert und nacheinander auf Zug senkrecht zur eigentlichen Moduloberfläche belastet. Mit einfachen Mitteln erhielt man das Ergebnis, dass die Blechlaschen, die eine Breite von ca. 15 mm und eine Materialstärke von ca. 2,5 mm hatten und an den Enden zu Winkeln gebogen waren, einer Belastung von mehr als 300 N nicht mehr widerstanden.

Bei grösseren Belastungen ergaben sich bleibende Verformungen der Laschen, so dass man das Gestell um einiges hin- und herbewegen konnte.



Abbildung 22: Belastung über Flaschenzug



Abbildung 23: vordere Lasche



Abbildung 24: hintere Lasche

Bei der Anlage „Kraftwerk 1“ ist man diesem Umstand begegnet, indem man die Abstände der Gestelle kleiner gehalten hat. Ausserdem ist dort die ganze Anlage durch den Verband genügend stabil. Als Konsequenz wird bei Folgeprojekten die Laschenbreite vergrößert.

5 Testanlagen

Als reine Testanlagen wurden im Rahmen des Projektes Solgreen die Ideen „Alpha“ und „C-Shape“ der EPFL-LESO und der Solstis S.a.r.l. in Lausanne und die Idee „Ständer“ der Enecolo AG erstellt. [8], [9]

5.1 Variante Alpha

Diese Variante beruhte auf der Idee, die kostengünstige und in der Baubranche vielfach verwendete Deltatec®-Platte aus recyceltem PE-Kunststoff nicht nur als Bodenplatte sondern auch als Material für die Ständerkonstruktion zu verwenden. Dazu schnitt man einfach eine weitere Platte schräg in zwei Teile mit dem gewünschten Anstellwinkel gegenüber der Horizontalen. Auf die Schnittkanten nietete man als Abschluss ein U-Profil aus verzinktem Blech. Stirnseitig wurden diese Blechprofile dann an die Bodenplatte bzw. an die Rückseite des Solface-Profiles, das auch von der EPFL entwickelt wurde, geschraubt. Auf dieses wurden dann die Lamine aufgelegt und mit Edelstahlklammern festgehalten.

Man kann auch gerahmte Module verwenden, die dann direkt von hinten an das U-Profil des Seitenteils geschraubt werden.



Abbildung 25: Prototyp der Variante Alpha



Abbildung 26: Die Lamine werden mit Solface-Profilen verbunden, die ihrerseits mit Hilfe von U-Profilen auf den Deltatec®-Platten fixiert sind.



Abbildung 27: von der Rückseite betrachtet



Abbildung 28: Die Lamine werden mit Edelstahlklammern festgehalten.

5.2 Variante „C-Shape“

Diese weitere Idee des EPFL-SOLSTIS-Teams basiert auf dem Produkt „Solgreen-Small“. Es wurde eine Testanlage bestehend aus 3 PV-Modulen auf dem Dach der Demosite neben der EPFL gebaut.

Die zugrundeliegende Idee ist, die guten Punkte des „alten“ Konzepts zu behalten und kleinere Verbesserungen hinzuzufügen, um das Produkt zu verbessern. Die Vorteile bisher sind, dass wenige Einzelteile benötigt werden und daher die Montage einfach, schnell und zuverlässig durchzuführen ist und dass eine Anlage modular aufgebaut ist, d.h., dass es egal ist, ob man nur einzelne Module oder komplexe Anlagen aufstellen will. Man kann auch bestehende Anlagen problemlos erweitern.

Das Hauptziel ist, das System billiger zu machen und den direkten Kontakt zwischen dem Stahlrohrrahmen und der Dachhaut durch Unterlegen der Deltatec®-Platte zu vermeiden, um dort Beschädigungen vorzubeugen.

Basierend auf diesen Überlegungen ist das System „C-Shape“ entwickelt worden mit zwei einzeln stehenden Stützen anstatt der alten grösseren. Dadurch ist der Transport der Stützen einfacher geworden. Als Grundplatte wurde die Deltatec®-Platte benutzt mit

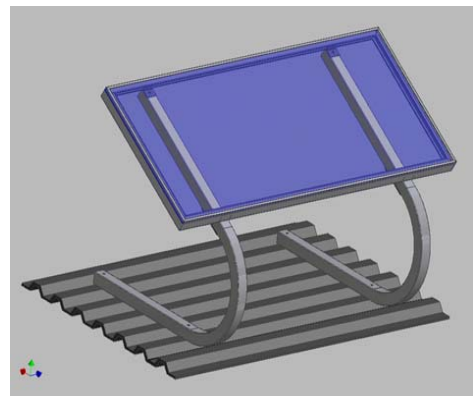


Abbildung 29: „C-Shape“

ihren oben erwähnten Vorteilen. Die Füße werden von oben auf die Grundplatte genietet, was sehr einfach zu machen ist. Das gerahmte PV-Modul wird befestigt durch Einhängen in eine simple Z-Klammer oben und Aufschieben einer Federklammer unten, wie sie schon für Solgreen 1 entwickelt wurde.

wichtige Punkte:

- Es wäre einfacher, wenn die Löcher in der Deltatec®-Platte in der Fabrik vorgebohrt würden.
- Das Ausrichten der Grundplatten ist einfach, da jedes Teil komplett unabhängig ist.
- Die PV-Module sollten länger als die Grundplatte sein (>118 cm); andernfalls sollten die Platten kürzer geschnitten werden bzw. überlappen lassen. Dadurch kann man die Module ganz eng aneinanderreihen ohne grosse Fugen.
- Die Befestigung der Module geht schnell vonstatten und gewährleistet eine gute mechanische Festigkeit.



Abbildung 30: Das Modul kann in die Klammer eingehängt werden.



Abbildung 31: Die Haltebügel werden unten aufgeschoben

Das "C-Shape"-Konzept ist eine innovative Design-Lösung, die wesentlich zu einer Verbesserung der Marktakzeptanz von PV-Integration auf Gründächern beitragen wird. Das Produkt hat einige wichtige Merkmale:

- Hohe Qualität bei niedrigen Kosten
- Einstellbar auf jede PV-Modulgröße
- Guter mechanischer Widerstand gegenüber starken Windkräften
- Einfache und zuverlässige Montage
- Sehr schönes Erscheinungsbild und einfache Wartung



Abbildung 32: fertig installierte Anlage

Das Konzept kann auch auf ungerahmte PV-Module (Lamine) angewendet werden. In diesem Fall sollten diese auf die Stahlrohre z.B. mittels 3M-Tape (doppelseitiges Klebeband) aufgeklebt werden. Ein versteifendes Stück Metall oder Ähnliches sollte ebenfalls zwischen die beiden Stahlrohre geklebt werden, um Längskräfte aufzunehmen, damit diese nicht das Laminat zerstören.

5.3 Variante Ständer

Bei dieser Demonstrationsanlage wurden im Mai 2001 insgesamt 6 Gestelle der aus U-Profilen geschweissten einbeinigen Version (Typ „Ständer“) zusammen mit 3 Deltatec®-Platten in die Erde vor dem Büro der Enecolo AG eingesetzt. [17] Dabei wurden zwei Bereiche von Fragestellungen untersucht. Erstens stand das verwendete Substrat im Mittelpunkt und



Abbildung 33: Testanlage Lindhof

zweitens sollten Erfahrungen in der Montage des Solface-Profiles gemacht werden.

Dazu wurde eine ca. 8-10 cm tiefe Grube ausgehoben (ca. 90 cm breit und 4 m lang) und 3 Deltatec®-Platten hineingelegt. Davon wurde eine mit Kies **und** Humus bedeckt jeweils in einer Schichtdicke von ca. 4 cm. Die anderen beiden Platten wurden **nur** mit Humus in einer Schichtdicke von ca. 8 cm bedeckt.

Drei Fragestellungen sollen erörtert werden:

1. Wächst das Gras/die Bepflanzung in beiden Fällen gleich oder gibt es Unterschiede?
2. Gibt es Unterschiede in der Festigkeit, mit der die Platten im Boden verankert sind?
3. Gibt es Unterschiede in der Ästhetik, in der Erscheinung für den Betrachter?

Dabei kann man feststellen:

1. Beide Stellen am Boden sind nach einem halben Jahr (Stand 27.11.01) gleich dicht mit Gras überwachsen.
2. An beiden Stellen lässt sich das Gestell ein wenig hin- und herwackeln. Man spürt, wie die Bodenplatte der Stahlstütze die Deltatec®-Platte in ihrer direkten Umgebung ein wenig anhebt (ca. 2-3 cm).
3. Ein Beobachter stellt keinen optischen Unterschied fest.

Zum Zweiten sollen mit einer probeweisen Montage von Solface-Profilen und 3 Glasplatten als Laminatersatz Erfahrungen im Umgang mit diesem Befestigungssystem gesammelt werden. Ausserdem werden zur Befestigung der Glasscheiben auch die Edelstahlklammern ausprobiert, die mit Gummistreifen unterfüttert werden.

Schlussfolgerungen sind:

1. Man muss mehr Möglichkeiten der Ausrichtung während der Montage haben.
2. Die reine Schraub-Verbindung zwischen Stütze und Solface-Profil ist zu unflexibel.
3. Die Edelstahlklammern erfüllen ihren Zweck hinreichend, wenn sie sich bei der Testanlage auch mit der Zeit sehr stark lockern. Das liegt aber daran, dass die Klammern nicht mit einer Zange nachgebogen wurden. Bei der Anlage „Kraftwerk 1“ wurde dies gemacht und dort ist alles in Ordnung.

6 Pilot- und Demonstrationsanlagen

Während des Projektes oder kurz davor wurden einige Anlagen erstellt, in denen die bisherigen Überlegungen einfließen und die neue Anregungen gaben, die dann wiederum in der nächsten Anlage weiterverarbeitet wurden.

Hier werden die einzelnen Projekte vorgestellt:

Die 30-kW-Anlage in Einsiedeln wurde nach dem Vorschlag der Firmen Enecolo AG und Ernst Schweizer Metallbau AG ausgeführt. Die Deltatec®-Platten lagen mit ihren Rändern auf den Kanten der Kastenprofile am Boden auf und verankerten die Gestelle so.

Gekauft wird der Solarstrom von der Strombörse des ekz, der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich. Die Installateure gaben wichtige Rückmeldungen über die Umstände bei der Montage, so dass diese Erfahrungen in der Weiterentwicklung miteinbezogen werden konnten.



Abbildung 34: Anlage Einsiedeln, Planung: Ars Solaris

Auf dem Dach der Firma Gasser in Chur wurde eine 11-kW-Anlage mit dem Typ Solgreen-Large als Unterkonstruktion gebaut.

Die Anlage ist sehr gut gelungen mit kurzer Bauzeit aber teuer.



Abbildung 35: Anlage Firma Gasser

Auf dem Dach des Schulhauses Wasgenring in Basel wurde eine 18-kW-Anlage montiert im Rahmen Solarstrombörse der Industriellen Werke Basel (IWB).

Diese Anlage fiel später dadurch auf, dass die Vegetation sehr üppig wuchs und die Module teilweise verschattete. Durch einmaliges Mähen pro Jahr kann dieses Problem jedoch gelöst werden. [18]



Abbildung 36: Anlage Wasgenring



Die Lamine wurden mit einem 3M-Band auf Z-Profile geklebt. Diese Verarbeitung funktionierte perfekt und es konnte der Aufwand durch die einfache Anwendung reduziert werden.

Abbildung 37: Verkleben der Lamine

Zwei von drei Dächern der neuen Wohnanlage „Kraftwerk 1“ in Zürich wurden mit Solgreen-Anlagen bedeckt. Die beiden leisten 9 und 16 kW_p. Das dritte Dach ist mit einer PV-Anlage auf Sofrel-Betonblöcken, die durch untergestellte Pflastersteine erhöht wurden, ausgestattet, die eine Leistung von weiteren 16 kW_p ins Netz der ewz einspeist. [19]

Eine detaillierte Bewertung wird die verschiedenen Unterkonstruktionen und Leistungswerte der Anlagen vergleichen. Dabei werden auch Windlastmessungen und Infrarot-Fotos miteinbezogen.



Abbildung 38: Blick auf eine der drei Teilanlagen auf der Wohnanlage „Kraftwerk 1“

7 Kosten

Ziel bei der ganzen Entwicklung am System Solgreen ist, ein oder mehrere kostengünstige Produkte zu erhalten, die sich auch im harten Wettbewerb in der Photovoltaikbranche behaupten können. Hierbei sind immer die Kosten pro Watt (peak), also der installierten Spitzenleistung, von Interesse, damit man einfacher die verschiedenen Varianten vergleichen kann.

Im Gegensatz zu PV-Anlagen auf Schrägdächern, die ihre nötige Neigung und Befestigungsstruktur zu einem grossen Teil vom bestehenden Dach übernehmen können, muss man bei Anlagen auf Flachdächern einen gewissen Mehraufwand betreiben. Die PV-Module müssen zur Sonne geneigt aufgeständert werden und dabei einen bestimmten Abstand zum Boden des Daches haben, wenn dieses begrünt werden soll, damit sie nicht von den Pflanzen beschattet werden und weniger elektrische Energie produzieren.

Das nötige Gestell muss natürlich alle Kräfte, die auf ihn durch Wind und Wetter einwirken, aufnehmen und auf das Dach übertragen. Das alles kostet zusätzliches Geld gegenüber Anlagen auf Schrägdächern. Andererseits hat man auch durchaus Einsparungen durch einfachere und schnellere Installation, bessere Wartbarkeit der Anlage und weniger aufwändige Sicherungsmassnahmen für die Monteure. Ein nicht in Franken auszudrückender Vorteil liegt in der Kombination von sauberer Energiegewinnung und der Schaffung von Lebensraum für Pflanzen.

Beim Bau der Test- und Demonstrationsanlagen im Rahmen des Projektes wurden die Kosten der benötigten Materialien und der Montagezeit erfasst und ausgewertet. Dadurch erhält man einen Eindruck davon, wie teuer ein bestimmtes verwendetes System ist. Man kann die verschiedenen Varianten miteinander vergleichen. Dabei muss man aber berücksichtigen, dass bei den Varianten „Haie“ und „C-Shape“ gerahmte Module verwendet werden. Die Module mit Rahmen sind um ca. 0,30 SFr. pro Watt teurer als die ungerahmten Lamine. Diese Mehrkosten müsste man bei einem direkten Vergleich mit dem System „Schere“ berücksichtigen. Daher ist auch bei der Befestigung der Lamine wie bei der Anlage Kraftwerk 1 ein grösserer Aufwand nötig und der höhere Preis zu verstehen.

Die Kosten konnten, wie erwartet, weiter gesenkt werden. Zur Zeit bewegt man sich bei dem Preis für die Unterkonstruktion für die PV-Module um die 0,80 – 0,95 SFr. pro Watt. Dabei betrachtet man absprachegemäss nur die Materialkosten.

Ein Nahziel ist es, den Preis auf 0,40 – 0,60 SFr. zu senken. Dies soll durch neue, einfachere Konstruktionen erreicht werden und zum Anderen durch Einstieg in die Massenproduktion bei einer vielversprechenden Lösung.

Bei der Bewertung stösst man auf die Material- und die Montagekosten. Man steht immer vor dem Problem: Wie hält man die Montagezeiten kurz und wie hält man die Materialien günstig? Will man die Montage vereinfachen, müssen die Bauteile bei der Fertigung schon bestimmte

Eigenschaften erhalten, was aber mit Mehraufwand also höheren Kosten einhergeht. Will man die benutzten Materialien einfach halten, hat man mehr Montageaufwand.

Bei der Auswahl der Materialien muss zudem beachtet werden, welche Witterungseinflüsse herrschen und dass die Konstruktion ca. 25 Jahre im Freien stehen muss, ohne Schaden zu nehmen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass sich bei der Entwicklung des Systems Solgreen während der Projektzeit immer Optimierungsmöglichkeiten ergaben, und dass man sich von der sicheren Seite aus auf die jetzt vorliegenden Lösungen zubewegt hat. Diese sind aber nicht das Ende der Entwicklung, sie sind vielmehr als Basis für weitere Verbesserungen zu sehen.

Anlagenname	Laminat/ gerahmte Module	Anlagengrösse in W_p	Montagekosten pro W_p	Materialkosten pro W_p	Gesamtkosten pro W_p
Solgreen Small (Wasgenring)	L	17,4 kW	0,93 SFr.	2,41 SFr.	3,34 SFr.
System Haie (EPFL und Solstis)	G	0,77 kW (Test)	0,24 SFr.	0,82 SFr.	1,06 SFr.
“C-Shape” (EPFL und Solstis)	G	10,0 kW (Test)	0,13 SFr.	0,94 SFr.	1,07 SFr.
System Schere (Kraftwerk 1)	L	25 kW	0,44 SFr.	0,91 SFr.	1,35 SFr.
System Schere mit neuem Profilsystem (Schätzung)	L	--	0,25 SFr.	0,80 SFr.	1,05 SFr.

Abbildung 39: Kostenauflistung für die verschiedenen Unterkonstruktionen

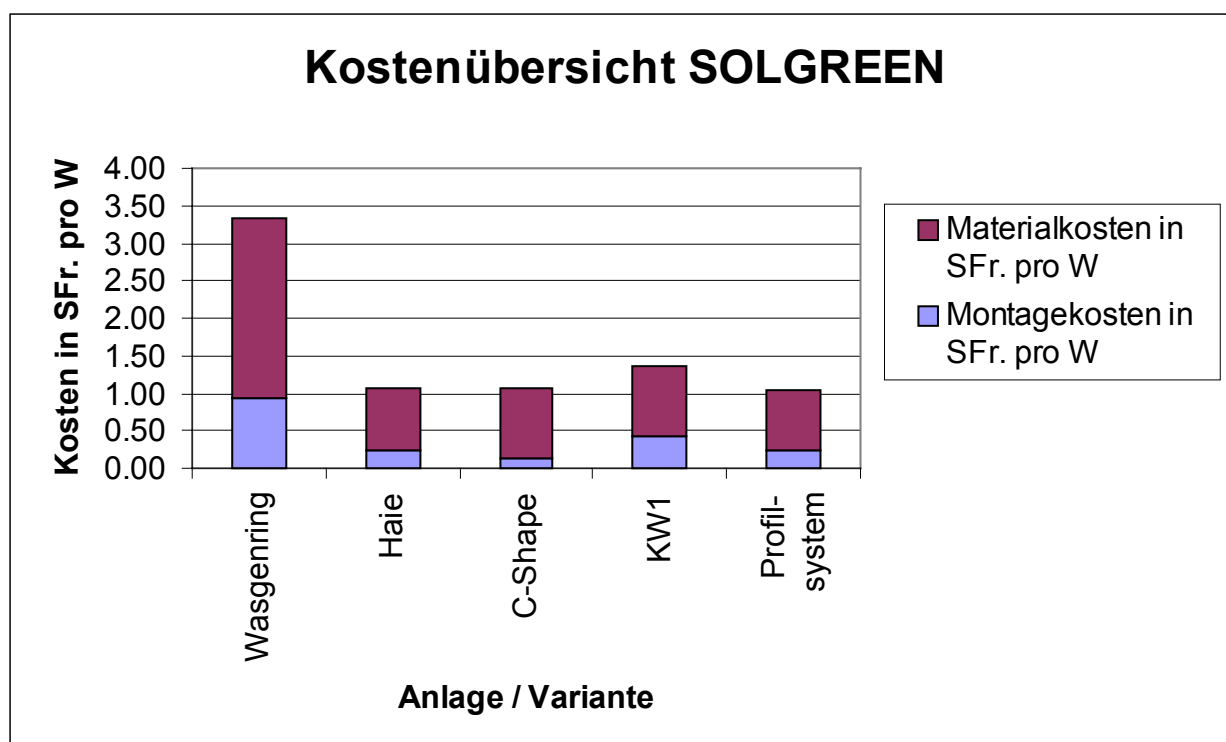


Abbildung 40: Diagramm über die Zusammensetzung der Kosten bei den einzelnen entwickelten Varianten

8 Zusammenfassung der Lösungen

Als Ergebnis des Projektes Solgreen hat man vier Varianten zur Hand:

1. Für gerahmte PV-Module verwendet man die Variante „C-Shape“. Die Module werden über Halteklammern an den Chromstahlbügeln befestigt.
2. Für ungerahmte PV-Module verwendet man die Variante „Schere“ zusammen mit dem neuen Profilsystem.
3. Bei kleinen Laminaten hat man wegen des geringeren Windwiderstandes die Möglichkeit, die Variante „Schere“ nur mit dem Vertikalprofil zu verwenden. Es verbindet dann aber die Gestelle horizontal miteinander. Darauf können die Lamine aufgelegt und mit Halteklötzen, die in den Gewindekanal geschraubt werden, gehalten werden.
4. Statt der Schraub- oder Klemmhalterung der Module wie unter 1. besteht auch die Option des Festklebens. Die Firma Solstis hat gute Erfahrungen damit gemacht,, gerahmte Module mittels speziellem, doppelseitigem Klebeband von 3M zu verkleben. Auch Lamine kann man so direkt auf den Chromstahlbügeln befestigen. Dann jedoch sollte eine zusätzliche Metallstrebe dazwischen geklebt werden, um Längskräfte aufzunehmen, damit diese nicht das Laminat zerstören.

9 Umsetzung am Markt

Einige Massnahmen zur Markteinführung wurden im Rahmen des Projektes durchgeführt. Dazu gehören die Präsentationen an nationalen und internationalen Konferenzen und Gespräche mit zahlreichen Firmen aus dem Bereich Flachdach. Eine bedeutende Rolle für die Ausweitung der Anwendung sind die bisher gebauten Pilotanlagen. Innerhalb der Projektphase wurde die Anlage Wasgenring und Kraftwerk 1 in Zürich gebaut.

Die Umsetzung am Markt startet mit einer relativ schwierigen Ausgangslage:

1. Die Systemkosten liegen höher als bisherige Systeme mit Plastikwannen oder Beton.
2. Der Markt in der Schweiz ist sehr klein.
3. Der zurzeit grosse Markt in Deutschland ist mit vielen Produkten für konventionelle Systeme schon gut bedient.
4. Es konnte kein neues Patent angemeldet werden, welches einen minimalen Schutz bietet.
5. Grosse Vorinvestitionen für Formen und Herstellungsautomaten sind zurzeit aus wirtschaftlichen Gründen kaum möglich.

Trotzdem sollen einige Produkte am Markt eingeführt werden.

Die Firma Solstis verkauft die bisherigen und die neue Varianten mit dem gebogenen Stahlbügel.

Ob und wie die Firma Ernst Schweizer im Markt auftreten wird ist noch offen. Weitere Grundlagen für die Markteinführung sollen am Nationalen PV-Seminar in Staffelstein, DE im März 2002 gesammelt werden.

Enecolo AG will nicht selber Produkte verkaufen wird aber selber weiterhin aktiv sein, um die neu entwickelten Lösungen für die Gründächer im Markt einzuführen. Enecolo will vor allem die neu entwickelten Profile fördern, weil damit ein Teil der angestrebten Kostenreduktion realisiert werden kann. Weiter wird Enecolo die allgemeine Werbung für Gründächer und Photovoltaik fortsetzen.

Als Spin-off des Solgreenprojektes hat die Firma Deltatec, welche die Grundplatte aus PE liefert, selber die Vermarktung der Platte übernommen. Neu wollen sie auch das gesamte System der Modulmontage für Gründächer anbieten. Die Produkte dazu sind noch nicht ausgewählt. Wenn möglich wollen sie ein breites Sortiment anbieten.

PV und Gründach funktionieren gut zusammen. Die Anwendung wird voraussichtlich einen hohen Anteil vom gesamten Flachdachmarkt erreichen. Das Projekt Solgreen hat wie vorgesehen die Markteinführung beschleunigt und löst zahlreiche Folgeaktionen und Vorhaben aus.

10 Referenzen

- [1] Enecolo AG, EPFL-LESO; Patentanmeldung von SOLGREEN in der Schweiz, 1997
- [2] M. Benner, Enecolo AG; Anforderungsliste, April 2000
- [3] Diplomarbeit Michael Benner vom Dezember 2000, zu Händen der Fachhochschule Köln
- [4] ZinCo GmbH, D-72669 Unterensingen; Planungshilfe „Das grüne Dach“, September 1998
- [5] P. Weber, Ernst Schweizer Metallbau AG; Windlasten für PV-Elemente, September 2000
- [6] O. Meichsner, Enecolo AG; Zusammenfassung der Windlastberechnung, November 2001
- [7] Chr. Roecker, F. Schaller, EPFL-LESO; SOLGREEN – Flat roof system for “Green Roofs”, 14th European PV Solar Energy Conference, Barcelona, July 1997
- [8] C. Roecker, F. Schaller, EPFL-LESO; J. Bonvin, SOLSTIS ; Prototype de la version Alpha: Rapport de travail, 2000
- [9] C. Roecker, F. Schaller, EPFL-LESO; „C-Shape“, 2001
- [10] M. Benner, Enecolo AG; Neue Ansichten, Zeichnungen der Systeme „Schiere“ und „Ständer“, 2000
- [11] O. Meichsner, Enecolo AG; Solgreen Scherengestell – Profilsystembericht, November 2001
- [12] O. Meichsner, Enecolo AG; Zusammenfassung des Berichtes zum neuen Profilsystems, Dezember 2001
- [13] Daniel Ruoss, P. Toggweiler, Enecolo AG; SOLGREEN: Jahresbericht an das Bundesamt für Energie (BfE), 2000
- [14] O. Meichsner, P. Toggweiler, Enecolo AG; SOLGREEN: Jahresbericht an das Bundesamt für Energie (BfE), 2001
- [15] D. Ruoss, Enecolo AG; SOLGREEN :PV on green roofs: Technology, Experiences and system improvements, Zusammenfassung der bisherigen Entwicklung anlässlich der PV-Konferenz in München, 2001
- [16] O. Meichsner, Enecolo AG ; Solgreen Scherengestell – Zugversuchsbericht, November 2001
- [17] D. Ruoss, Enecolo AG; 3rd Test Installation SOLGREEN “Lindhof”, Mai 2001
- [18] J. Rasmussen, Enecolo AG; Dachunterhalt PV Anlage Wasgenring, Juni 2001
- [19] D. Ruoss, J. Rasmussen, Enecolo AG; Short report – SOLGREEN installation ‚Kraftwerk I‘, Juni 2001