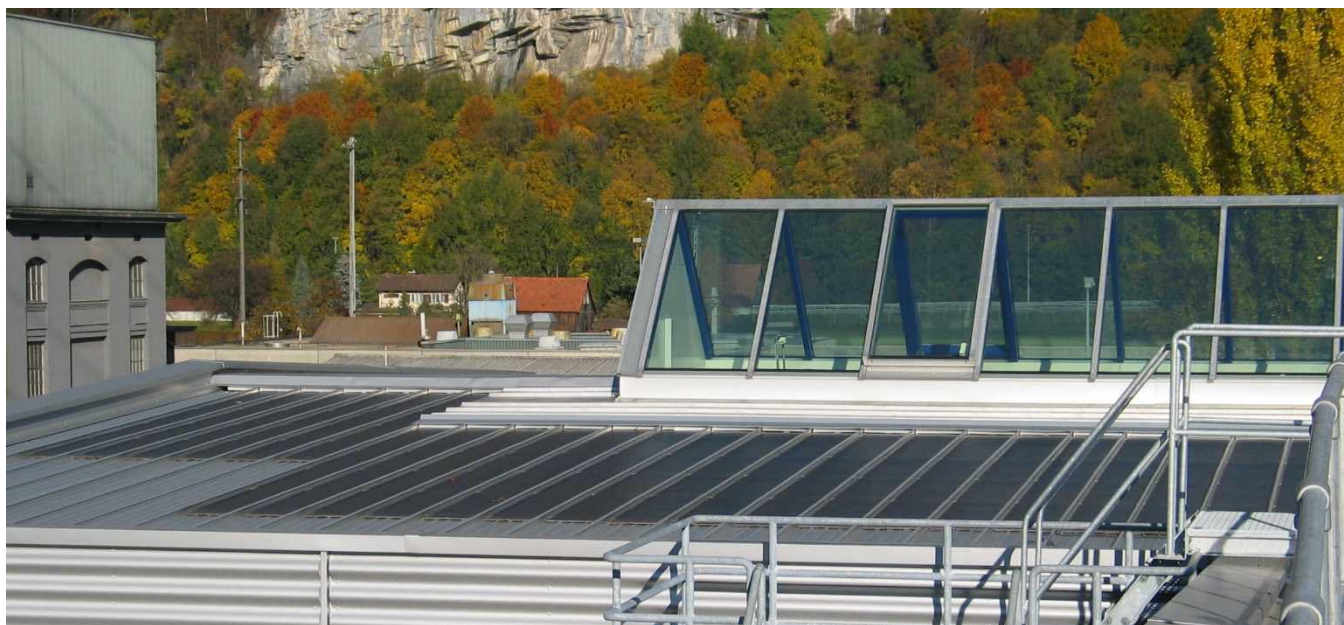


Schlussbericht PV P+D, DIS 37526 / 77265, März 2004

# PV Eurodach amorph

## Abschlussbericht

ausgearbeitet durch:  
**Markus Gubser / Hugo Kessler**  
**PAMAG Engineering**  
Industriestrasse 8, 8890 Flums  
[www.pamag.ch](http://www.pamag.ch)



## Inhaltsverzeichnis:

1. Abstract .....	3
2. Zusammenfassung .....	3
3. Ausgangslage / Ziele .....	4
4. Anlagenbeschreibung .....	4
4.1 Photovoltaikmodul .....	5
4.2 Systemverbund mit Metallfalzdach .....	5
4.3 Elektrischer Aufbau .....	6
4.4 Messeinrichtung .....	7
5. Hauptergebnisse .....	8
5.1 Wissenschaftliche, normierte Auswertung der Daten .....	8
5.2 Berechnung der monatlichen Performance Ratio .....	9
5.3 Temperaturverhalten der Module auf dem thermisch isolierten Metallfalzdach .....	11
5.4 Temperaturverteilung .....	11
5.5 Energieertragsprognose .....	12
6. Schlussfolgerungen / Perspektiven .....	13
6.1 Weiterentwicklung .....	13
7. Publikationen .....	13

## Abbildungsverzeichnis:

<i>Abb 1 Skizze Dachaufbau auf Eurodach .....</i>	<i>4</i>
<i>Abb 2 Aufbau Triple-Junction-Cell .....</i>	<i>5</i>
<i>Abb 3 Zelle auf Metaldach .....</i>	<i>5</i>
<i>Abb 4 Elektrischer Aufbau .....</i>	<i>6</i>
<i>Abb 5 Messeinrichtung .....</i>	<i>7</i>
<i>Abb 6 Normierte Erträge 2001 .....</i>	<i>8</i>
<i>Abb 7 Performace Ratio .....</i>	<i>8</i>
<i>Abb 8 Normierte Erträge 2002 .....</i>	<i>9</i>
<i>Abb 9 Performance Ratio 2002 .....</i>	<i>9</i>
<i>Abb 10 Zusammenfassung der PR .....</i>	<i>10</i>
<i>Abb 11 Temperaturkoeffizient .....</i>	<i>11</i>
<i>Abb 12 Temperaturverteilung (Juli) .....</i>	<i>12</i>
<i>Abb 13 Neues System mit gerahmten Modulen .....</i>	<i>13</i>

## 1. Abstract

EURODACH is the effective combination of a folded metal roof and full area thermal insulation with rock wool. The combination with PV solar modules is a new development of Flumroc Inc. and Schneider mounting systems. The goals of this project are to get a multifunctional roof as weather protection, thermal insulation and electricity production, to get experience with the mechanically connected materials having different temperature coefficients, and to learn about the energy yield of the PV installation with amorphous triple cell modules.

The company Flumec in Flums has a flat roof with an integrated 3kWp solar cell array. The roof is at an angle of 3° and orientated towards the SW. The solar generator is an amorphous-triple-cell 128Wp module. The cell-strings are connected in parallel to a central alternating current convertor. There is a measuring instrument connected to the system to collect data for scientific investigation. The system provides a weather shield, thermal insulation and energy production in one unit. Because the cells are insulated underneath, and there is no free air flow, the module reaches temperatures of up to 65 °C.

Taking into account the geographical position of Flums, a 3 kW installation will generate around 2670kWh.

Effective output in 2001: 2456,3 kWh (difference: -8,7%)

Effective output in 2002: 2512,2 kWh (difference: -6,6%)

The installation has been running for 3 years. During this time there have been no breakdowns and no need for any maintenance. The temperature range of the modules has proven correct for this application.

The modules were provided with special frames by the company Schneider Leichtbausysteme, Andwil. These could then be fastened to the roof with special clips causing no piercing to the roofing material. Unfortunately this fixing system proved to be rather expensive and time consuming. This system has now been abandoned. Flumroc has now found a better system for fixing the modules to the roof. This system also allows a vertical adjustment of the panels. Please see 6.1 for further information.

## 2. Zusammenfassung

In das Flachdach der Firma Flumec in Flums wurde eine 3kWp (3072Wp) Photovoltaikanlage integriert. Das Metallfalzdach ist 3° geneigt und nach SW orientiert. Als Solargenerator wurde ein amorphes 128Wp-Modul mit Tripelzellen eingesetzt. Die Modulstränge sind parallel geschaltet und auf einen zentralen Wechselrichter geführt. An die im Netzverbund betriebene Anlage ist ein Messsystem zur wissenschaftlichen Auswertung angeschlossen. Das System ist Wetterschutz, thermische Isolierung und Energielieferant in Einem. Dadurch dass die Zellen auf der Unterseite thermisch isoliert und nicht hinterlüftet sind, erreichen die Module Temperaturen bis zu 65 °C.

Bezogen auf den Standort Flums kann, für eine 3kW-Anlage, mit einem Jahresenergieertrag von 2670 kWh gerechnet werden.

Effektiver Ertrag 2001: 2456,3 kWh (Abweichung -8,7%)

Effektiver Ertrag 2002: 2512,2 kWh (Abweichung -6,3%)

Die Anlage ist unterdessen 3 Jahre in Betrieb. Während dieser Zeit traten weder Störungen auf, noch mussten Unterhaltsarbeiten durchgeführt werden. Das Temperaturverhalten der Module hat sich als geeignet für diesen Zweck erwiesen.

Die Module wurden seinerzeit durch die Firma Schneider Leichtbausysteme, Andwil mit einem Rahmen versehen, welcher dann mit speziellen Klammern auf am Metallfalz des Daches befestigt werden konnte ohne das Dach zu verletzen. Diese Methode hat sich dann aber als zu aufwändig und zu teuer erwiesen, sodass die Produktion eingestellt wurde. Flumroc hat sich aus diesem Grund nach einem neuen System umgesehen und ist fündig geworden. Das neue System lässt sich bei Bedarf aufständern. Mehr dazu unter 6.1.

### 3. Ausgangslage / Ziele

Entwicklung des multifunktionalen Dachelementes PV-EURODACH als Wetterschutz, Wärmedämmung und neu zusätzlich als Energielieferant. Systementwicklung, Evaluation PV-Element, Projektierung, Realisierung und Inbetriebnahme Pilotprojekt 3kW auf dem Dach des Neubaus Flumec, Planung, Realisierung und Inbetriebnahme Messsystem, Visualisierung und Internetanschluss, Durchführung und Abschluss Messphase. Insbesondere sollen die projektspezifischen Besonderheiten wie Temperaturverhalten, Beschattung und Verschmutzung untersucht werden.

### 4. Anlagenbeschreibung

In das Dach der Montagehalle der Firma Flumec in Flums wurde eine 3kW Photovoltaikanlage integriert. Das Metallfalzdach ist 3° geneigt und nach SW orientiert. Als Solargenerator wurde das amorphe 128-Watt-Modul mit Tripelzellen von UNISOLAR eingesetzt. An die im Netzverbund betriebene Anlage ist ein Messsystem angeschlossen, Gleichstrom, Wechselstrom, AC-Leistung und eingespeisene Energie werden gemessen. Die Modulstränge sind parallel geschaltet und auf einen zentralen Wechselrichter geführt.

Dach und Solargenerator bilden beim EURODACH-Solar eine Einheit. Das System ist geeignet für Steil-, Tonnen- oder leicht geneigte Dächer. Die Wahl amorpher Tripelzellen hat die Vorteile, dass aufgrund der optischen Erscheinung und der Biegsamkeit der Module die Integration bei Gebäuden begünstigt wird. Ausserdem weisen die Module einen gegenüber kristallinen Modulen etwa zehnmal geringeren negativen Temperaturkoeffizienten auf, was bei hohen Oberflächentemperaturen eine rund 10% höhere Leistung ergibt.

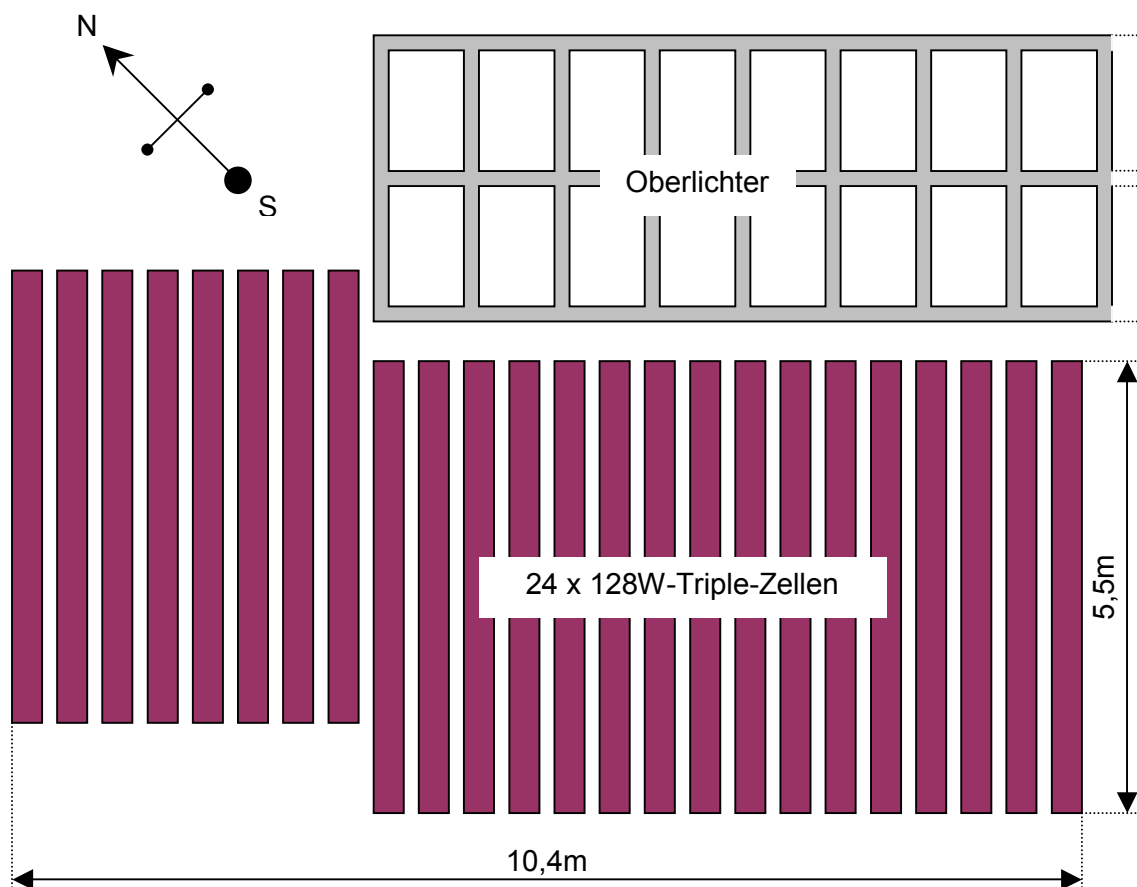


Abb 1 Skizze Dachaufbau auf Eurodach

## 4.1 Photovoltaikmodul

Zum Einsatz kommt eine amorphe Silizium-Dünnschichtfolie. Mit einer kontinuierlichen Depositionsmethode wird auf einer Edelstahlfolie amorphes Silizium in drei Schichten aufgetragen. Es entsteht ein Schichtensystem wobei die obere, mittlere und untere Schicht Sonnenlicht verschiedener Wellenlängen einfangen. Durch die Aufteilung in verschiedene Wellenbereiche bis ins nahe Infrarot erreicht man einen Energie-Umwandlungswirkungsgrad von über 8%. Amorphes Silizium ist einfach in der Gewinnung, kostengünstig und äusserst widerstandsfähig. Die Zelle wurde von der Firma CANON entwickelt. Hergestellt wird sie von der Firma UNISOLAR in einem Durchlaufprozess für Rollen bis zu 5.4m Länge mit 0.4m Breite. Das Material ist umweltverträglich, dünn, elastisch, leicht und gut zu verarbeiten. Als Oberflächenmaterial wird das wetterresistente Polymer TEFZEL eingesetzt.

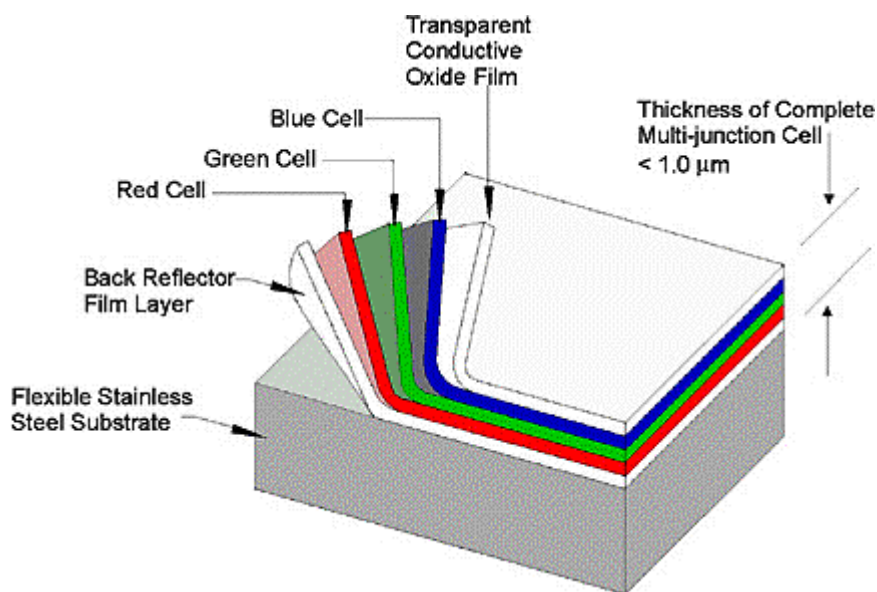


Abb 2 Aufbau Triple-Junction-Cell

Die Module wurden so entwickelt, dass sie auch größte Umweltbeanspruchungen überstehen und zuverlässig und effizient Energie über einen langen Zeitraum produzieren. Für eine gute Alterungsbeständigkeit bürgt die 20-jährige Leistungsgarantie des Herstellers.

Die Silizium-Dünnschichttechnik ist in der Energieausbeute bedeutend weniger temperaturabhängig, was im Sommer bei hohen Temperaturen eine höhere Leistung ergibt als vergleichbare kristalline Zellen. Somit kann auf eine Hinterlüftung verzichtet werden.

Weiter ist die Dreischicht-Technik deutlich empfindlicher für Licht im blau-grünen Bereich des Spektrums als kristallines Silizium. Folgt daraus, dass die Dünnschichtzelle bei bewölktem Himmel also rein diffuser Einstrahlung bis zu 20% besser abschneiden als kristalline Zellen. Dieser Effekt wirkt sich auch positiv auf die Dämmerlichtempfindlichkeit aus.

## 4.2 Systemverbund mit Metallfalzdach

Die Photovoltaik-Folie wird auf das Metallfalzblech aufgebracht. Konstruktiv wird sichergestellt, dass die beiden Materialien welche sehr unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen, keine mechanischen Spannungen auf die Solarzelle ausüben.

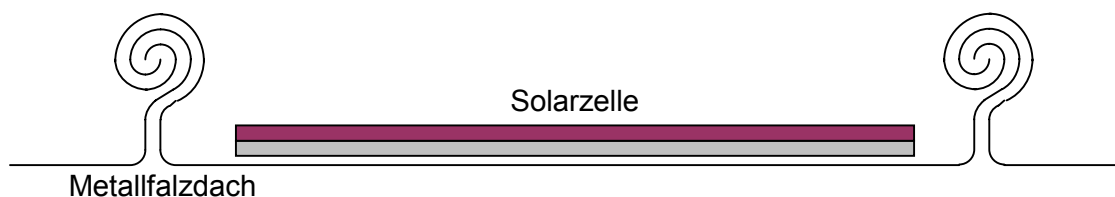


Abb 3 Zelle auf Metaldach

### 4.3 Elektrischer Aufbau

Die 24 Photovoltaikmodule werden in 8 Strängen à 3 Module zusammengeschaltet und deren Energie über einen Wechselrichter ins öffentliche Netz eingespeisen.

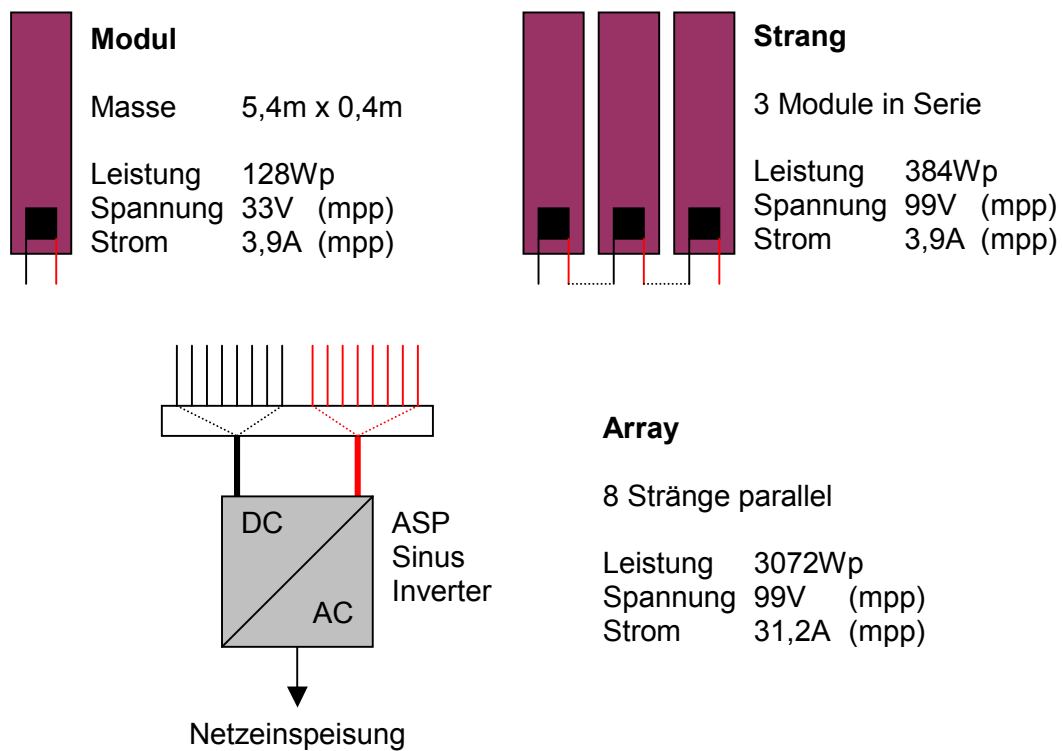


Abb 4 Elektrischer Aufbau

#### 4.4 Messeinrichtung

Für die Erfolgskontrolle besteht ein Messsystem, mit welchem eine Energiebilanzierung auf Tages, Monats- und Jahresbasis erstellt wird.

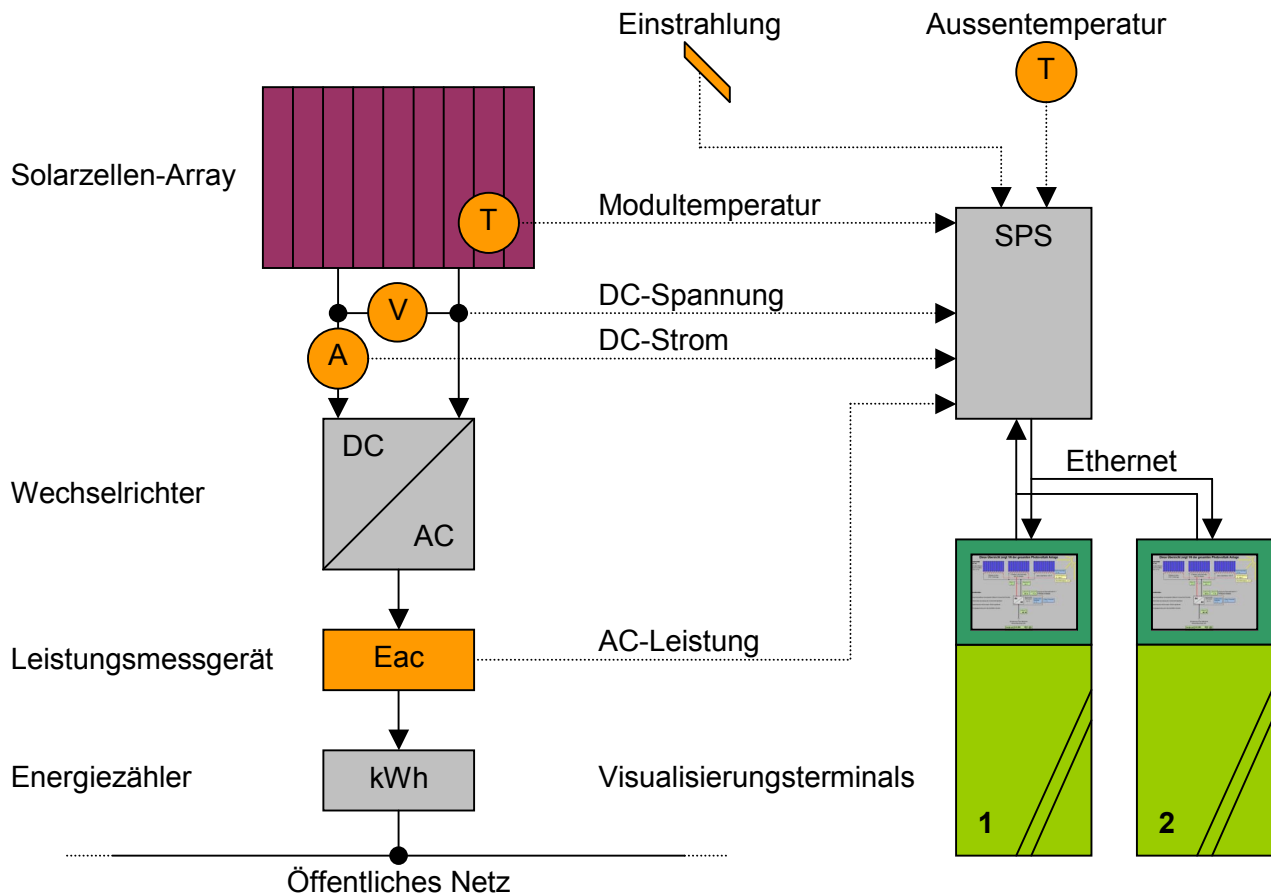


Abb 5 Messeinrichtung

Die Sensoren sind auf eine SPS (Steuerung der Gebäudeautomation) geführt. Die AC-Leistung wird in der SPS über die Zeit aufsummiert. So kann die abgegebene Energiemenge auf der Visualisierung angezeigt werden.

Die Messdaten werden zu einer standardisierten Darstellung aufbereitet und auf der Visualisierung (Eingangsterminal 1 und 2) sowie auf der Homepage ([www.flumroc.ch](http://www.flumroc.ch)) automatisch aktualisiert.

## 5. Hauptergebnisse

Es wurden folgende Erträge erreicht:

2001: 799kWh/kWp

2002: 818kWh/kWp

### 5.1 Wissenschaftliche, normierte Auswertung der Daten

Es folgen die Auswertungen für das Jahr 2001

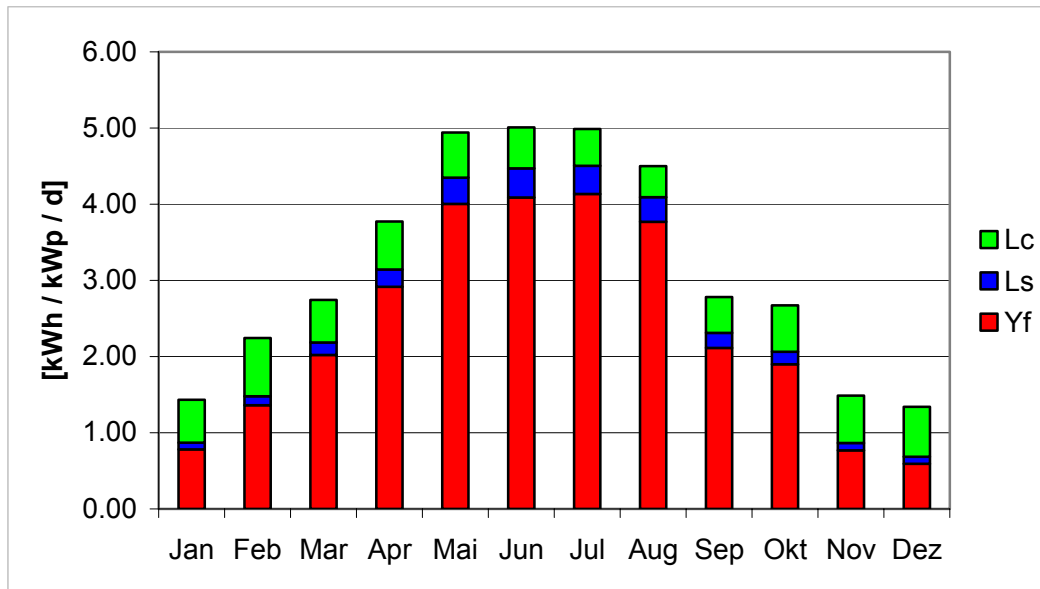


Abb 6 Normierte Erträge 2001

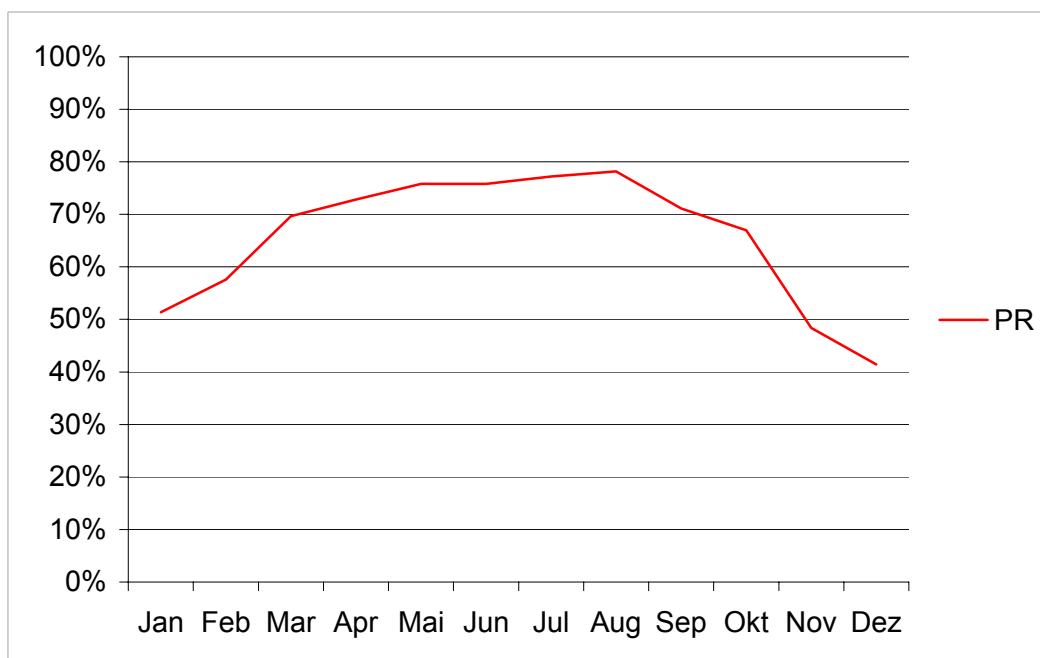


Abb 7 Performance Ratio



Es folgen die Auswertungen für das Jahr 2002

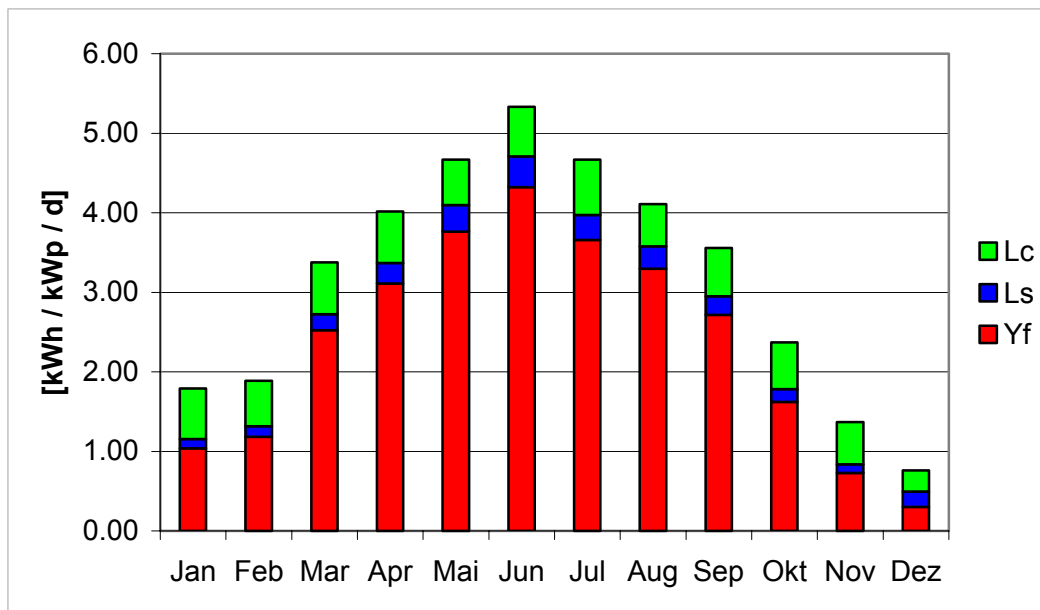


Abb 8 Normierte Erträge 2002

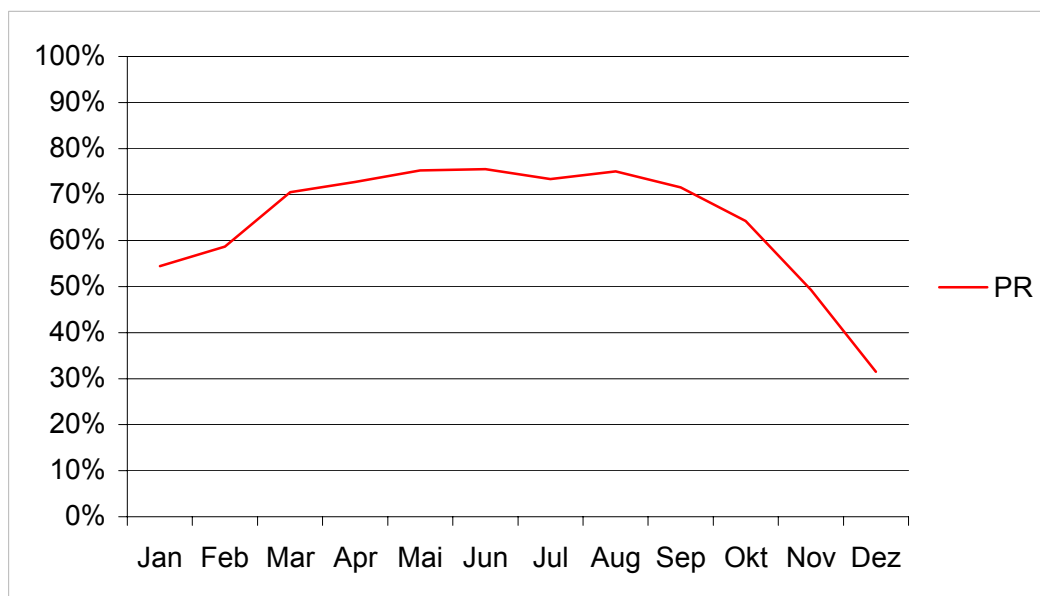


Abb 9 Performance Ratio 2002

## 5.2 Berechnung der monatlichen Performance Ratio

### Der normierte Ertrag der Anlage (Yf)

Der Ertrag (Yf) gibt an, wie viele Stunden pro Tag durchschnittlich die Solaranlage mit Nennleistung Energie ins öffentliche Netz gespeist hat.

$$Y_f = E_{ac} / 3072 \text{ Wp} / \text{Tage}$$

### Der normierte Ertrag der Solargeneratoren (Ya)

Der Ertrag aus den PV-Modulen (Ya) entspricht eigentlich Yf, mit dem Unterschied, dass die Leistung und die Energie nicht auf der Wechselstromseite, sondern auf der Gleichstromseite betrachtet werden.

$$Y_a = E_{dc} / 3072 \text{ Wp} / \text{Tage}$$

### Die normierte Einstrahlung (Yr)

Yr gibt an, wie viele Stunden pro Tag die Sonne mit einer Leistung von  $1000 \text{ W/m}^2$  auf die PV-Module scheint.

### Verluste (Ls und Lc)

Der Verlust des Wechselrichters (Ls) hat wiederum die Masseinheit Stunden pro Tag und ist die Differenz zwischen Ya und Yf. Der Verlust an den PV-Modulen (Lc) ist die Differenz zwischen Yr und Ya.

### Die Performance Ratio (PR)

Diese Kennziffer ist das wichtigste Kriterium für die Effizienz einer PV-Anlage. Über sie können Photovoltaikanlagen miteinander verglichen werden. Die PR ist das Verhältnis zwischen dem eingespeisten Ertrag Yf und dem Lichteinfall Yr.

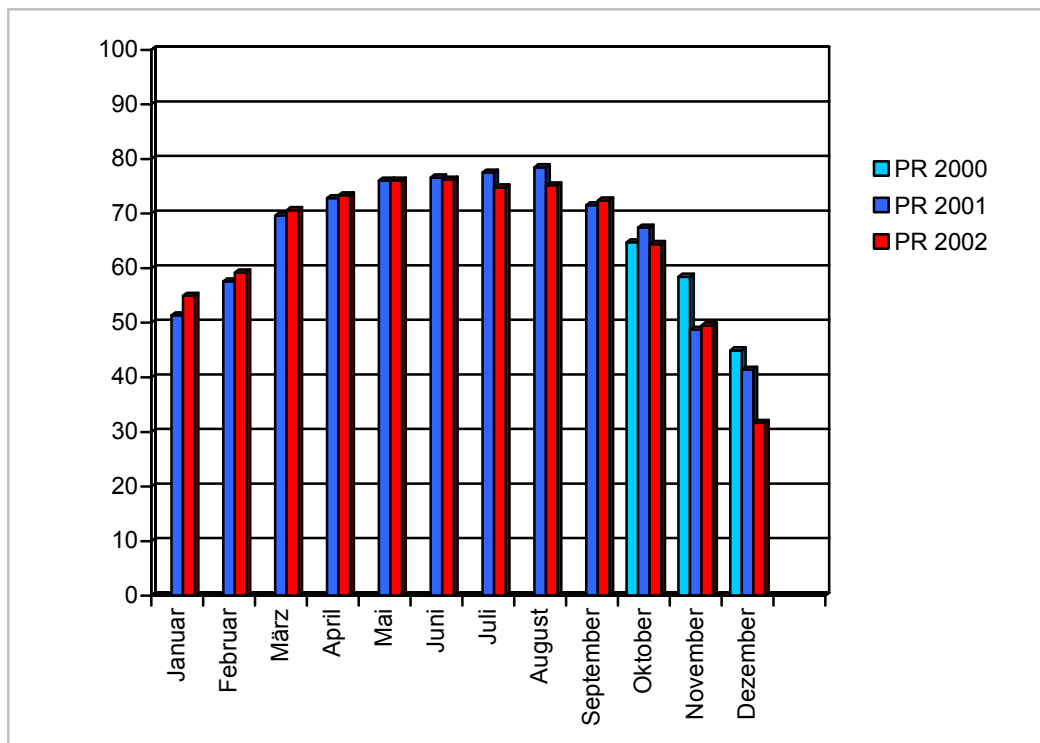


Abb 10 Zusammenfassung der PR

Die PR dieser Anlage ist im Vergleich mit anderen Anlagen derselben Zelle schlecht. Die mittlere PR ist ca. 66%. Die Nachfolgeanlage die mit gerahmten US116 Modulen gebaut wurde und dieselbe Ausrichtung auf dem Dach hat wie die beschriebene, weist wesentlich höhere PR-Werte auf ( $\approx 80\%$ ) und zeigt kleinere Verluste Lc. Wir schliessen daraus das die Leistungsminderung durch die Integration ins Dach erfolgt. D.h es muss angenommen werden das die Abschattung der Zelle durch den Metallfalz doch erheblich ist.

### 5.3 Temperaturverhalten der Module auf dem thermisch isolierten Metallfalzdach

Typisch für amorphe Solargeneratoren ist die geringe Temperaturabhängigkeit der MPP-Spannung. Anhand der Messresultate lässt sich ein deutlich geringerer Spannungs-Temperaturkoeffizient erkennen, als bei kristalliner Technologie. Während bei kristallinen Modulen und hohen Temperaturen die Performance Ratio sinkt, ist das bei amorphen Zellen gerade umgekehrt. Die fehlende Hinterlüftung ist also kein Nachteil obwohl im Sommer die Modultemperatur zeitweise über 60°C lag. Vergleiche hierzu auch Abb12.

In der Grafik ist die Leistungsdifferenz (dPdc) zwischen der, anhand der Globalstrahlung, erwarteten und der abgegebenen Leistung in Abhängigkeit der Temperatur aufgezeichnet.

Die Leistung eines Moduls beträgt 128Wp. Aus Abb 11 resultiert ein Temperaturkoeffizient von **-0,122%/K**. Dies ist deutlich weniger (Faktor 4-5) als bei kristallinen Modulen.

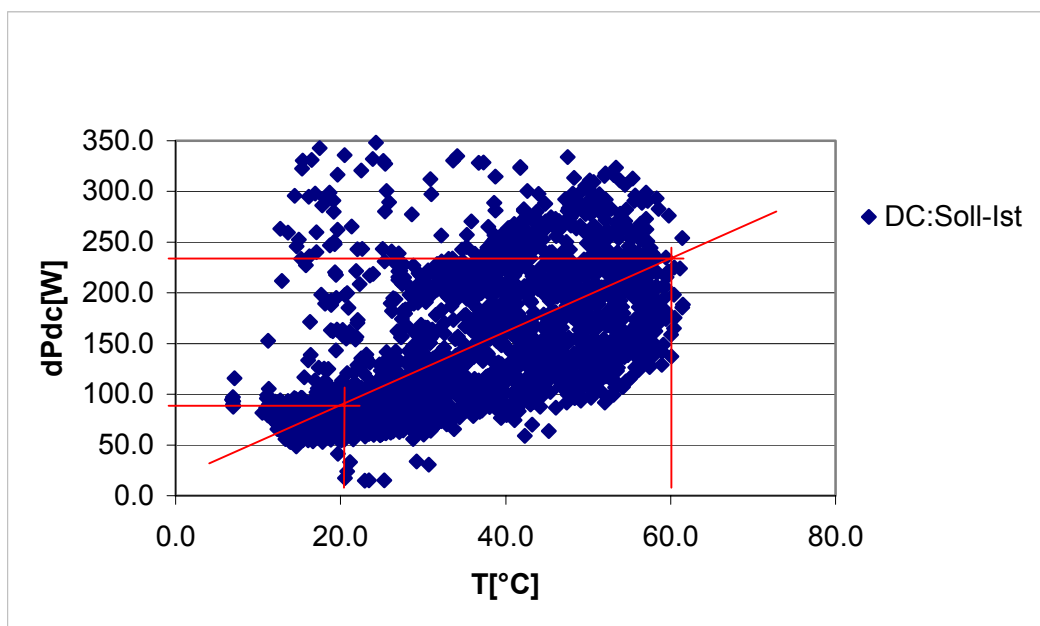


Abb 11 Temperaturkoeffizient

### 5.4 Temperaturverteilung

Die normierten Auswertungen zeigen die höchste Leistung im Monat Juni. Um die Temperaturen auf der Solarzelle auf dem Metaldach besser aufzuzeigen dient wie in Abb 12 ersichtlich ein Histogramm der Modultemperatur. Wir haben hier nur den Monat Juni ausgewertet.

Die Messeinrichtung erfasste alle 10min. die Temperatur des Moduls (10min-Mittelwerte). In der Y-Achse wird die Anzahl Messwerte angezeigt. Wir sehen darum aus der Grafik ebenfalls wie lange das Modul bei welcher Temperatur produzierte. Schlussfolgerungen:

	Jahr 2001	Jahr 2002
Maximale Temperatur des Moduls	60.5 °C	63.8 °C
Mittlere Modultemperatur bei Einstrahlung > 80W/m2	30.7 °C	33.9 °C
Verminderung der Leistung bei mittlerer Temperatur	0.7%	1.1%

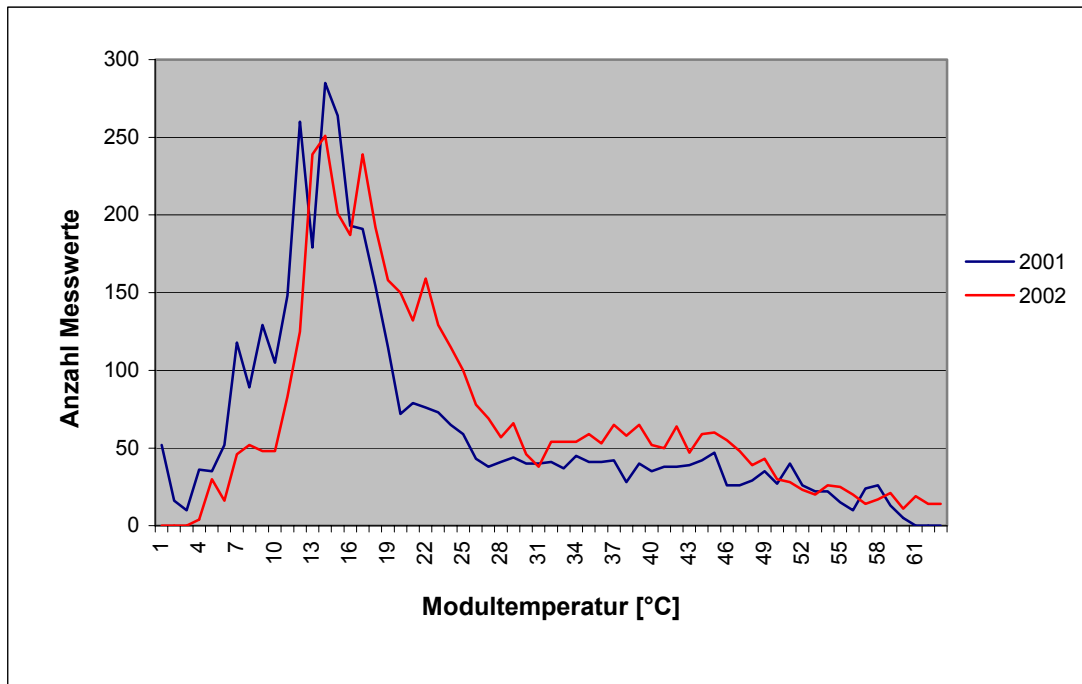


Abb 12 Temperaturverteilung (Juli)

### 5.5 Energieertragsprognose

Die Einstrahlungsdaten publiziert von der SMA Meteonorm95 lauten, für die Strahlungssumme der Globalstrahlung bezogen auf den Standort Flums, auf 1155 kWh/Jahr.  
 Gemäss Photovoltaik-Energiestatistik herausgegeben vom VSE beläuft sich der mittlere spezifische Energieertrag auf 770-860 kWh/kWp pro Jahr.

Bei der Prognose wurde ein PR-Wert von 75% angenommen. Der erreichte Wert liegt durchschnittlich bei 2484kWh. Dies ist 7.5% weniger als erwartet.

## 6. Schlussfolgerungen / Perspektiven

Anhand der Jahresberichte zeigen die eingesetzten Dünnschichtzellen ein geeignetes Verhalten für diese Variante der Dachintegration.

### 6.1 Weiterentwicklung

Im Herbst 2001 wurde, ebenfalls auf dem Dach der Flumec, eine 20.8kWp Anlage installiert. Hier handelt es sich ebenfalls um Tripelzellen der Firma Unisolar (US-116). Diese Module sind grösser und besitzen einen Alurahmen. Das Gewicht je Modul ist mit 20kg ideal für die Handhabung.

Auf das Metallfalzdach werden Aluschienen montiert und die Zellen werden, ohne eine einzige Schraube, darin eingehängt. Die Luft kann unter den Modulen zirkulieren. Auf eine Aufständering wurde aus wirtschaftlichen Gründen verzichtet, der Winkel beträgt somit 3°.

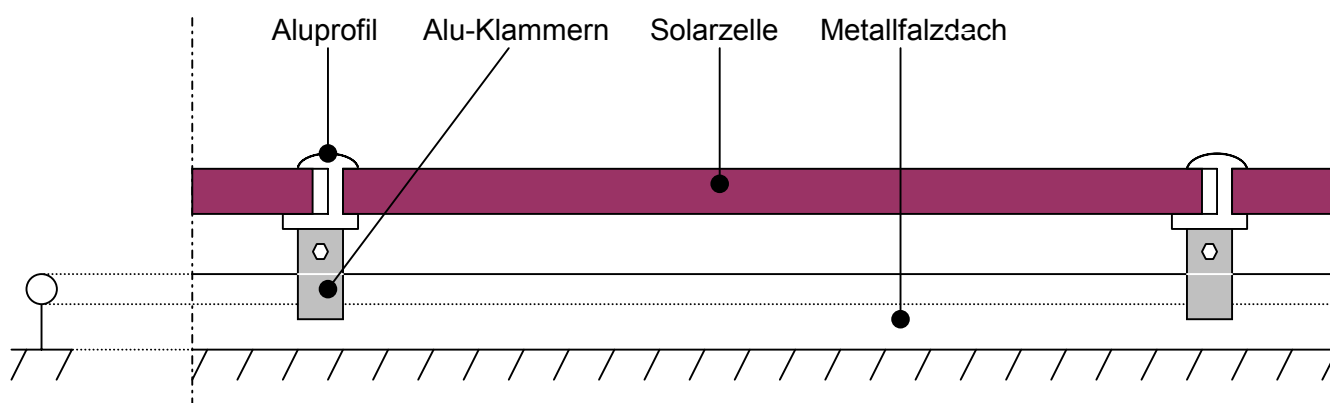


Abb 13 Neues System mit gerahmten Modulen

Die Zellen leisten  $30V_{mpp}$  und  $3,88A_{mpp}$ . Es wurden 6 Wechselrichter mit Strängen von  $300V_{mpp}$  und  $11,64A_{mpp}$  zusammengeschaltet. Nach dem ausserordentlich guten Sommer 2003 hat sich gezeigt, dass es besser ist mit nur 27 (statt 30) Modulen auf jeweils einen Wechselrichter zu fahren. Die Wechselrichter sind, unter anderem durch die hohen Temperaturen, an ihre Leistungsgrenze gestossen und haben den Arbeitspunkt verschoben. So konnte nicht mehr die maximale Leistung in's Netz abgegeben werden. Aus diesem Grund musste auch der Elektroschrank, der im freien steht, zwangsbelüftet werden. Bei der Auslegung der Anlage wurde mit weniger Leistung gerechnet als sie effektiv abgibt. Trotz Arbeitspunktverschiebung konnte die Energieertragsprognose noch übertroffen werden, was dem hohen PR-Wert von  $\approx 80\%$  zu verdanken ist.

Es hat sich gezeigt, dass diese Art der Befestigungstechnik wirtschaftlicher zu realisieren ist. Werden die Module US116 verwendet ist das Gewicht von 20kg im Verhältnis zur Grösse des Moduls für diese Art des Daches optimal. Da meist Industrie- und Gewerbebauten mit Metallfalzdächern ausgerüstet sind, ist der hohe Platzverbrauch pro Installiertem kW kein Nachteil.

Ohne Neigung sollte man die Zellen nicht installieren. Die Selbstreinigung ist dadurch nicht mehr gegeben und die Zellen verschmutzen sehr schnell.

## 7. Publikationen

Laufende Publikationen der Flumroc AG wie die NOVA-Zeitung

Seit November 2002 ist die neue 20.8kWp Anlage in Betrieb. Die Auswertung ist gleich wie bei der 3.1kWp Anlage.

Die Internetseite [www.flumroc.ch/photovoltaik/](http://www.flumroc.ch/photovoltaik/) zeigt die weitere Entwicklung und die Messergebnisse auf.

Der nach Investitionsrechnung ausgewiesene kWh Preis von weniger als 69Rp. Ist als voller Erfolg für diese Art der PV-Anlagen zu sehen.