

Schlussbericht PV P+D, DIS 37'006 / 81'193, Dezember 2003

PV-Anlage Dock E vormals Dock Midfield Zürich Flughafen

ausgearbeitet durch:
Markus Hubbuch [1], Thomas Gautschi [2]
ARGE ZAYETTA [3]
c/o Martin Spühler Arch. BSA/SIA, Sihlramtstrasse 10, 8002 Zürich



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Abstract..... | 3 |
| 2. Einleitung / Projektziele | 3 |
| 3. Kurzbeschreibung des Projekts / der Anlage | 4 |
| 3.1. Architektur und Bauweise..... | 4 |
| 3.2. Aufbau der PV-Anlage..... | 4 |
| 3.3. Eigen- und Fremdbeschattung..... | 6 |
| 3.4. Montage der Module | 7 |
| 4. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse | 8 |
| 4.1. Bau der Anlage..... | 8 |
| 4.2. Ergebnisse | 8 |
| 4.3. Bewertung des Ertrages..... | 11 |
| 4.4. Performance Ratio | 12 |
| 4.5. Bewertung der Beschattungswirkung und gestalterischen Einfügung ins Gebäude | 12 |
| 4.6. Wirtschaftliche Bewertung der Anlage | 14 |
| 5. Nationale / internationale Zusammenarbeit..... | 14 |
| 6. Referenzen / Publikationen | 14 |

Verzeichnis der Abbildungen

| | |
|--|----|
| Bild 1: Schema Energiekonzept [11] | 4 |
| Bild 2: Nutzungskonzept des Gebäudes [11] | 4 |
| Bild 3: Detailansicht einer Solarlamelle und der Unterkonstruktion | 6 |
| Bild 4: Die optimal ausgerichteten Solarlamellen..... | 7 |
| Bild 5: Messung der Paneltemperatur. Die Temperaturerhöhung gegenüber Umgebungsluft beträgt bei fast 950 W/m ² Strahlung auf der Südseite nur ca. 19°C, was eine Begründung für den hohen Ertrag der Anlage darstellt. Auf der Nordseite ist die Paneltemperatur tiefer. | 9 |
| Bild 6: Ertrag und Vergleich mit Strahlung über ein Jahr. Die Abweichungen Strahlung und Ertrag sind teilweise auf ungleiche Ablese- resp. Erfassungszeitpunkte zurückzuführen. | 10 |
| Bild 7: Tagesmessung einer Anlage im Frühjahr | 10 |
| Bild 8: Messung des Leistungsverlaufes über einen Tag einer Untereinheit im Sommer. | 11 |
| Bild 9: Statistik des spezifischen jährlichen Ertrags der PV-Anlagen in der Schweiz [6], eingezeichnet erwarteter Wert PV-Anlage Dock E..... | 11 |
| Bild 10: monatliche Performance Ratio. Die Schwankungen sind teilweise auch auf unterschiedliche Ablesezeitpunkte des Ertrages zurückzuführen. | 12 |
| Bild 11: Auch das Dach ist bewusst gestaltet und bildet die fünfte Fassade..... | 13 |
| Bild 12: Eine Anzeigetafel zeigt die momentane Leistung und den jährlichen Ertrag der Solaranlage und macht die Besucher des Zuschauerbereiches auf die PV-Anlage aufmerksam | 13 |

1. Abstract

The new terminal building Dock E (formerly Dock Midfield) at Zurich airport has been completed November 2002, and taken into normal operation September 2003. Since April 2002 the 290-kW-photovoltaic-plant on top of the building works without problems. The produced electricity is reported from the beginning of the plant-operation. The gained energy is well above the expected values and clearly above the mean value of Swiss PV-power-plants. This is on one hand due to the sunny summer 2003, but also a result of optimal plant design, a very good power output of the delivered PV-panels and high efficiency inverters.

The photovoltaic plant is integrated in the pergola-roof of the building. It has, beside the production of renewable energy, two other functions: As an important element of the buildings architectural design it gives the building its appearance and forms the roof. Secondly the pergola with the PV-elements shades the south facade at the attic level, where the lounges are located.

Because of its attractive part of the architectural design and the optimal integration in the building, the plant won the Swiss price "hommage solaire" 2002, in the category best integrated plants.

This installation is also part of the European research project PHOTOCAMPA: PV grid connected system in parking and roof, 5. EU-framework program. A part of the plant is measured following the guidelines of ISPRA research centre.

2. Einleitung / Projektziele

Die unique (Flughafen Zürich AG) als Bauherrin des Docks E hatte zu Beginn der Planung sechs ausgewählten Planungsteams die Aufgabe gestellt, ein möglichst energiesparendes und umweltfreundliches Gebäude zu entwerfen. Weiter war ein günstiges Gebäude gefordert, welches trotzdem ein möglichst attraktives Tor zur Welt darstellt. Aus dieser Wettbewerbssituation ging die ARGE ZAYETTA [3] als Siegerin hervor. Der Entwurf sah eine optimale Integration der Gebäudetechnik mit den Bauteilen vor, die Nutzung regenerativer Energiequellen und die Minimierung des Energieverbrauches. Möglich wurde dieser erfolgreiche Entwurf durch eine integrale Planung im Team von Architekten, Bauingenieuren und Gebäudetechnik-Ingenieuren. Gekrönt werden sollte das Gebäude mit einer Solaranlage, welche gut sichtbar die Anstrengungen für eine optimale Energieeffizienz aufzeigt. Die Bauherrin hat sich in der Folge entschieden, diese Anlage zu realisieren, nicht zuletzt dank der Unterstützung der Anlage als P+D-Anlage durch das Bundesamt für Energie.

Mit der PV-Anlage auf dem Dock E sollte eine exemplarische Anlage geschaffen werden, welche die Möglichkeiten der Photovoltaik aufzeigt, als Teil der Gebäudestruktur genutzt zu werden. Die gute Sichtbarkeit der Anlage und der Ort als Ankunfts- und Abflugterminal für Millionen von Flugpassagieren jährlich soll zur Akzeptanz und weiteren Verbreitung der Photovoltaik beitragen. Ein wesentliches Ziel war es, dass die Photovoltaik-Anlage zur Attraktivität der Gestaltung des Gebäudes beiträgt und auch in dieser Hinsicht einen echten Mehrwert darstellt.

Diese PV-Anlage übernimmt mehrere Aufgaben, insbesondere die Beschattung der Lounge-Geschossfassade und teilweise der Pufferzonenfassade, den gestalterischen Abschluss des Gebäudes nach oben und die Produktion von Solarstrom. Dadurch konnte auch auf der Kostenseite eine vorbildliche Anlage realisiert werden. Anstelle konventioneller Glaslamellen wurden PV-Lamellen montiert, die Nutzung der Pergola-Struktur war quasi gratis möglich. Dadurch war eine echte Einsparung bei den Investitionskosten möglich, und diese Anlage konnte zu vergleichsweise günstigen Preisen erstellt werden.

Auf der technischen Seite war es das Ziel, die neuesten Erkenntnisse betreffend Blitzschutz, Sicherheit und Überwachung von Solaranlagen anzuwenden und die bestmögliche Invertertechnologie einzusetzen. Dank der optimalen Ausrichtung, der bestmöglichen Hinterlüftung und der fast völlig fehlenden Beschattung soll ein möglichst hoher Energieertrag ermöglicht werden. Die rahmenlosen Module sollten zu einer Senkung der Investitionskosten, zu einer Reduktion der grauen Energie und zu einer guten Selbstreinigung bei Regen führen. Darüber hinaus sind die rahmenlosen Module ästhetisch attraktiver.

Mit der Erfassung der Ertragsdaten der Anlage soll eine Erfolgskontrolle und die Überwachung des optimalen Betriebes erreicht werden.

3. Kurzbeschreibung des Projekts / der Anlage

3.1. Architektur und Bauweise

Das Dock E ist ein schlichter, schlanker Bau von 488 Metern Länge. Die Verbindung zu den bestehenden Flughafenanlagen erfolgt durch die Skymetro, einer unterirdischen automatischen Luftkissenbahn. Die Distanz zwischen dem Dock E und den bestehenden Terminalbauten beträgt knapp einen Kilometer.

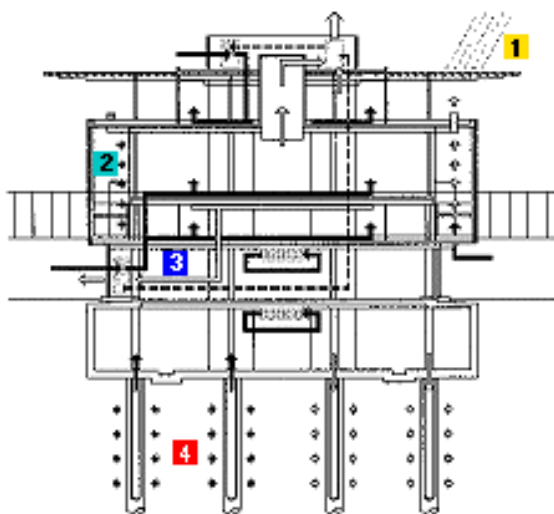
Das Gebäude ist nahezu durchsichtig

Das Gebäude trägt die Handschrift der Architekten Spühler und Angélil/Graham/Pfenninger/Scholl. Die Glasfassade und die grossen Oberlichter lassen das Gebäude nahezu durchsichtig erscheinen. Die hellen, transparenten Innenräume sind untereinander mit Rolltreppen verbunden und durch mehrgeschossige, begrünte Höfe gegliedert. Abfliegende Passagiere erreichen ihr Flugzeug über offene Rampen entlang den Glasfassaden, ankommende Reisende gelangen direkt zur Station der Skymetro.

Energiesparender Betrieb

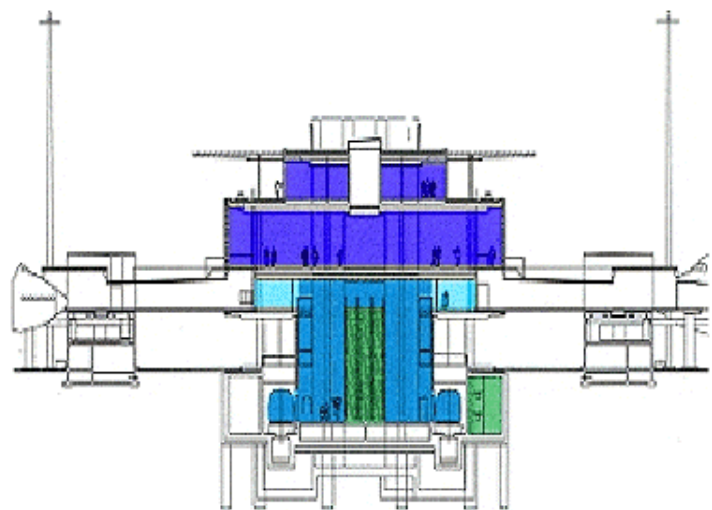
Die Gestaltung der Doppelfassaden als Klimapuffer verringert den Energiebedarf für die Klimatisierung. Heizung und Kühlung erfolgen zu einem grossen Teil mittels Energiepfählen. Sowohl die Nutzung der Abwärme der Lüftungsanlagen als auch der Räume mit hohen internen Lasten erfolgt mit hohen Wirkungsgraden. Die knappe Dimensionierung der Anlagen, kurze Luftkanäle, Tageslichtnutzung und eine effiziente Beleuchtung helfen, den Strombedarf zu minimieren. Die Nutzung des Regenwassers, begrünte Dächer, ökologische Baustoffe sowie der völlige Verzicht auf PVC-haltige Baustoffe sind weitere Komponenten des umweltschonenden Konzeptes.

Als sichtbare Komponente und Krönung dieses umfassenden Energiekonzeptes dient die Solaranlage.



- 1 Photovoltaikanlage
- 2 Doppelfassade als Klimapuffer
- 3 Dezentrale Lüftung mit Verbund-WRG
- 4 Energiepfähle für Kälte und Wärme

Bild 1: Schema Energiekonzept [11]



- Abflug, Lounges, Shopping, Restaurants, Zuschauer
- Skymetro
- Ankunft, Sicherheitskontrolle, Betriebsräume
- Gepäcksortieranlage

Bild 2: Nutzungskonzept des Gebäudes [11]

3.2. Aufbau der PV-Anlage

Die PV-Anlage Dock E besteht aus 5 Teilanlagen. Pro Kern ist eine Teilanlage vorhanden, welche ihrerseits wieder in zwei Unteranlagen aufgeteilt sind. Die eine Unteranlage umfasst jeweils die südseitig installierten Module, die zweite die Module der Nordseite. Jede Unteranlage ist auf einen separaten Wechselrichter geführt, damit sind insgesamt 10 Wechselrichter vorhanden.

Es sind je 15 Lamellenreihen pro Seite vorhanden. Je 2 Lamellenreihen bilden einen Strang, so dass eine gerade Anzahl aktiver Lamellenreihen vorhanden sein muss. Auf der Südseite ist also aus technischen Gründen eine Lamellenreihe ohne Solarzellen ausgeführt, damit sind südseitig 7 Stränge möglich. Auf der Nordseite sind die Lamellenreihen nahe der Fassade im Winter durch die Dachaufbauten beschattet. Deshalb sind sie ohne Zellen ausgeführt. Auf der Nordseite sind noch 8 Reihen nutzbar und damit 4 Stränge möglich. Diese insgesamt 11 Stränge sind auf je zwei Unteranlagen pro Kern zusammengefasst. Die „Unteranlage Süd“ umfasst 6 Stränge, die „Unteranlage Nord“ 5.

Da es eines der architektonischen Prinzipien war, dass alles „echt“ ist (z. B. auch keine Verschalungen), wurden die nicht aktiven Lamellen weiss gestaltet und nicht mit Zellenattrappen bedruckt.

Die Strangverkabelungen sind so ausgeführt, dass nur minimale Schlaufen entstehen. Damit kann die Induktion von Überspannung verursachenden Strömen bei Gewittern vermindert werden. Alle Strangkabel sind einzeln direkt auf die fünf DC-Schränke in den Elektroverteilräumen der Kerne geführt, wo weitere Blitzschutzmassnahmen realisiert wurden. Im Feld sind somit keinerlei Komponenten vorhanden, natürlich mit Ausnahme der Solarpanels mit den Anschlussboxen und den By-Pass-Dioden.

Um die Feldverkabelung möglichst einfach zu halten und die Kabellängen zu minimieren, sind die einzelnen Solarlamellen in Serie verschaltet und wurde eine hohe, aber noch unproblematische Strangspannung gewählt. Die ganze Länge der Solarpergola kann in 5 Teile, entsprechend den Kernen des Gebäudes, geteilt werden. Die in Serie geschalteten Solarlamellen von zwei Lamellenreihen pro Kern ergeben gerade eine optimale Spannung (siehe Tabelle 1).

| Kern | Seite | Anzahl Stränge | Anzahl Module in Serie | Strangspannung open circuit / MPP | Max. DC-Leistung MPP | Leistung Wechselrichter DC |
|------|-------|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|
| B | Süd | 6 | 88 | 739 V / 591 V | 30,1 kW | 33 kW |
| B | Nord | 5 | 88 | 739 V / 591 V | 25,1 kW | 24 kW |
| C | Süd | 6 | 90 | 756 V / 605 V | 30,7 kW | 33 kW |
| C | Nord | 5 | 90 | 756 V / 605 V | 25,6 kW | 24 kW |
| D | Süd | 6 | 90 | 756 V / 605 V | 30,7 kW | 33 kW |
| D | Nord | 5 | 90 | 756 V / 605 V | 25,6 kW | 24 kW |
| E | Süd | 6 | 90 | 756 V / 605 V | 30,7 kW | 33 kW |
| E | Nord | 5 | 90 | 756 V / 605 V | 25,6 kW | 24 kW |
| F | Süd | 6 | 94 | 790 V / 632 V | 32,1 kW | 33 kW |
| F | Nord | 5 | 94 | 790 V / 632 V | 26,8 kW | 24 kW |

Tabelle 1: Konfiguration der Teilanlagen

| | Total | | Süd | | Nord | |
|--------------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| Installierte Leistung | 283 | kW | 180 | kW | 103 | kW |
| Nennleistung Modul | 57 | W | 57 | W | 57 | W |
| Anzahl Module | 4'972 | Stk. | 3'164 | Stk. | 1'808 | Stk. |
| Modulfläche | 4'239 | m ² | 2'697 | m ² | 1'541 | m ² |
| Solarzellenfläche | 2'173 | m ² | 1'383 | m ² | 790 | m ² |
| Anzahl Leermodule | 2'004 | Stk. | | | | |
| Fläche Leermodule | 1'708 | m ² | | | | |
| Lamellenfläche insgesamt | 5'947 | m ² | | | | |

Tabelle 2: Technische Daten der Gesamtanlage

3.3. Eigen- und Fremdbeschattung

Die Leermodule sind montiert, wo die Dachaufbauten beschatten, das heisst auf den ersten Reihen nordseitig. Der Beschattungswinkel wurde mit knapp 20° gewählt.



Bild 3: Detailansicht einer Solarlamelle und der Unterkonstruktion

Die Lamellen beschatten sich auch gegenseitig. Deshalb ist immer nur der obere Teil der Lamellen mit Solarzellen belegt. Der untere ist Teil dagegen leer. Auch hier beträgt der Beschattungswinkel knapp 20°.

Um Ertragsverluste infolge der Beschattung zwischen den einzelnen Lamellen zu vermeiden, sind die Module in Hochstrom-Ausführung mit je drei parallel geschalteten Zellenreihen ausgeführt. Damit ist am Morgen oder Nachmittags je nur eine Reihe Zellen pro Modul beschattet, die oberen beiden Zellenreihen können weiter Strom liefern. Auch die Stranganordnung trägt dazu bei, dass bei Beschattung durch die Gebäudeaufbauten höchstens ein Strang betroffen ist.

Die Fremdbeschattung ist nur minimal, es sind keine Berge oder andere Gebäude vorhanden. Der Horizont ist in allen Richtungen sehr tief. Einzig die südseitigen Beleuchtungskandelaber (für die Vorfeldbeleuchtung) werfen im Winter einen kleinen, wandernden Schatten auf die südseitigen Lamellenreihen. Simulationen zufolge resultiert eine Ertragseinbusse von weniger als 5%. Aus den Messungen ist diese Einbusse nicht nachweisbar.

3.4. Montage der Module

Die Ausrichtung der Module ist um 10° von einer exakten Südausrichtung nach West abgedreht, entsprechend der Ausrichtung des Gebäudes.

Der Anstellwinkel der Module beträgt 25°. Die Module sind fix auf Tragrohre montiert.

Die ungerahmten Solarmodule, wie auch die Leermodule, sind je 0.55 m breit und ca. 1.50 m lang. Sie sind mit je vier Löchern versehen. Mit rostfreien Schrauben und Muttern sowie mit synthetischen Kautschuk-Unterlagscheiben und Hülsen sind die Module auf die Stahl-Unterkonstruktion geschraubt.

Da in der Nähe der landenden und startenden Flugzeuge mit Flügelrandwirbeln gerechnet werden muss und das Gebäude windexponiert auf einer Ebene steht, wurden an die mechanische Stabilität grosse Anforderungen gestellt. Die max. Last (Druck oder Sog) auf die Module ist mit 2.9 kN/m^2 spezifiziert. Der Hersteller konnte mit Belastungsversuchen nachweisen, dass diese Anforderungen mit einem 5mm dicken, gehärteten Glas erfüllt werden.

Im Bruchfall zerfällt das Glas in kleine Krümel. Die rückseitige Folie hat genügend Festigkeit, damit ein zerbrochenes Modul an den Befestigungsschrauben hängen bleibt und nicht hinunter fallen kann. Auch dies wurde in Versuchen nachgewiesen.



Bild 4: Die optimal ausgerichteten Solarlamellen

Die gewählte Montageart gewährleistet eine optimale Hinterlüftung der Module.

Jedes Modul weist eine Plus- und eine Minusboxe auf. Die Module wurden mit vormontierten Kabeln mit Stecker und einer Buchse in der Minusboxe geliefert. Dabei muss die Plus- und Minusseite und die Kabellänge jeweils genau dem Montageort des Moduls angepasst sein. Damit gibt es unterschiedliche Module, welche sich in diesen Details unterscheiden. Die Elektroverkabelung wurde damit sehr einfach und sehr sicher. Es musste lediglich das Kabel in die Minusbuchse gesteckt werden.

Die weissen Leermodule sind gleich aufgebaut und wurden genau gleich montiert.

Während der Planung wurde mit unterschiedlichen Zwischenfolien, Bedruckungen der Rückfolie und Gitterstoffen experimentiert, um das Aussehen der Module zu optimieren. Sowohl aus ästhetischer Sicht wie auch infolge technischen und preislichen Überlegungen wurde dann aber eine konventionelle weisse Rückfolie gewählt.

4. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

4.1. Bau der Anlage

Der Bau der Anlage konnte ohne Probleme abgeschlossen werden. Es musste genau auf den Arbeitsablauf beim Bau des ganzen Gebäudes und der Fassaden Rücksicht genommen werden. Nur während jeweils kurzen Zeitabschnitten waren die Baugerüste etappenweise für die Montage der Module nutzbar. Damit war eine exakte Terminplanung erforderlich. Die Solarlamellen und Leerlamellen wurden pünktlich und in der geforderten Qualität geliefert.

Eine besondere Herausforderung war die Anbindung der Stromzähler pro Anlage über ein Messbussystem an das übergeordnete, bereit bestehende Gebäudemanagementsystem des Flughafens. Die Bewältigung der Schnittstellen zwischen den Systemen stellte an die beteiligten Unternehmungen grosse Anforderungen. Aus diesem Grund wurden die Monatswerte direkt an den Anlagen von Hand abgelesen.

4.2. Ergebnisse

Der Betrieb seit April 2002 zeigt auf, dass das Ziel, eine zuverlässig produzierende Solaranlage zu erstellen, voll und ganz erreicht wurde.

Im ersten Jahr des Betriebes, bis ca. August 2003, war das Gebäude noch im Bau- resp. Ausbauzustand und dementsprechend waren immer wieder Stromabschaltungen erforderlich. Zudem waren einzelne Anlagen infolge Tests oder Mängelbehebung manchmal ausgeschaltet. Damit war der Ertrag teilweise kleiner als er sein könnte. Seit September 2003 ist das Dock nun in ordnungsgemäsem Betrieb und solche Störungen sollten nicht mehr auftreten.

Die Anlagen beim Kern B (Nord und Süd) sowie die Anlage Süd Kern C werden separat im Rahmen des Projektes PHOTOCAMPA gemäss Vorgaben ISPRA ausgemessen [4].

Aus dem Bild 5 ist die Paneltemperatur an einem sonnigen und heissen Sommertag ersichtlich. Auf der Südseite heizt die warme Luft der Fassade zusätzlich etwas auf. Die Temperaturerhöhung ist aber moderat und tiefer als bei dachintegrierten Anlagen, was die gute Hinterlüftung dokumentiert.

| Monat | Sonneneinstrahlung global, geneigt | | | Ablesedatum | Simulation | Ertrag | Abweichung |
|--------|------------------------------------|--------------------|------------|-------------|------------|--------|------------|
| | Simulation | Effektiv | Abweichung | | | | |
| | kWh/m ² | kWh/m ² | % | | kWh | kWh | % |
| Mrz 02 | 97.3 | | | | 22'890 | 19'181 | -16.2% |
| Apr 02 | 121.0 | | | | 27'931 | 25'919 | -7.2% |
| Mai 02 | 141.5 | 148.8 | 5.2% | | 31'957 | 26'486 | -17.1% |
| Jun 02 | 149.6 | 182.8 | 22.2% | | 33'421 | 41'106 | 23.0% |
| Jul 02 | 165.7 | 164.7 | -0.6% | | 36'515 | 34'709 | -4.8% |
| Aug 02 | 147.4 | 145.9 | -1.0% | 02.09.02 | 32'659 | 34'711 | 6.3% |
| Sep 02 | 111.0 | 116.6 | 5.1% | 01.10.02 | 24'997 | 27'277 | 9.1% |
| Okt 02 | 72.8 | 86.3 | 18.5% | 31.10.02 | 16'453 | 18'378 | 11.7% |
| Nov 02 | 37.1 | 31.9 | -14.0% | 02.12.02 | 8'425 | 7'593 | -9.9% |
| Dez 02 | 23.8 | 13.5 | -43.3% | 07.01.03 | 5'073 | 3'440 | -32.2% |
| Jan 03 | 30.6 | 27.9 | -8.8% | 03.02.03 | 6'865 | 6'606 | -3.8% |
| Feb 03 | 54.2 | 71.3 | 31.6% | 28.02.03 | 12'936 | 14'345 | 10.9% |
| Mrz 03 | 97.3 | 150.4 | 54.5% | 01.04.03 | 22'890 | 36'034 | 57.4% |
| Apr 03 | 121.0 | 159.5 | 31.8% | 30.04.03 | 27'931 | 37'050 | 32.6% |
| Mai 03 | 141.5 | 153.5 | 8.5% | 02.06.03 | 31'957 | 38'788 | 21.4% |
| Jun 03 | 149.6 | (219.6) | 46.8% | 30.06.03 | 33'421 | 43'771 | 31.0% |
| Jul 03 | 165.7 | 188.9 | 14.0% | 04.08.03 | 36'515 | 47'543 | 30.2% |
| Aug 03 | 147.4 | 187.8 | 27.4% | 29.08.03 | 32'659 | 36'330 | 11.2% |
| Sep 03 | 111.0 | 151.7 | 36.7% | 29.09.03 | 24'997 | 35'642 | 42.6% |
| Okt 03 | 72.8 | 73.9 | 1.5% | 27.10.03 | 16'453 | 16'764 | 1.9% |
| Nov 03 | 37.1 | | | | 8'425 | | |

Tabelle 3: Messwerte im Vergleich mit Simulationen. Die Strahlungsmesswerte Juni 03 konnten nicht aufgezeichnet werden und sind gem. Messung SMA umgerechnet.

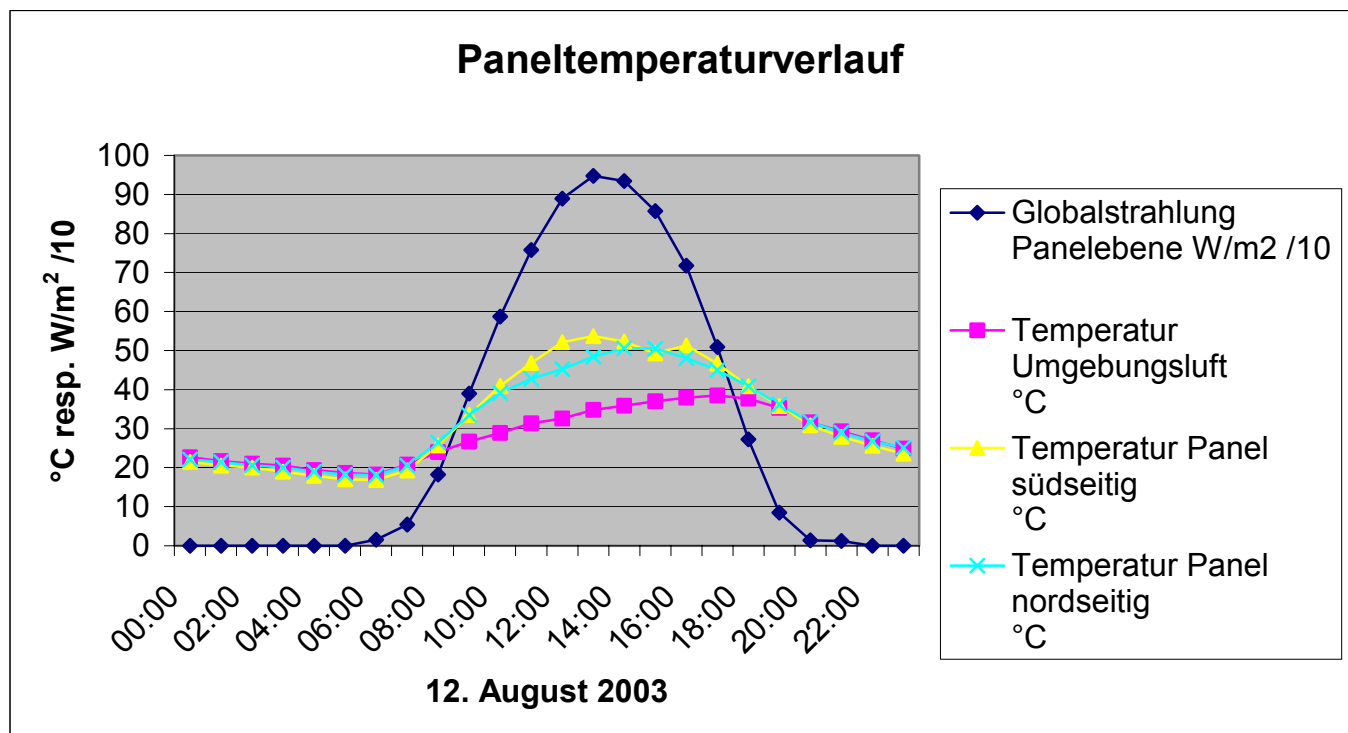


Bild 5: Messung der Paneltemperatur. Die Temperaturerhöhung gegenüber Umgebungsluft beträgt bei fast 950 W/m² Strahlung auf der Südseite nur ca. 19°C, was eine Begründung für den hohen Ertrag der Anlage darstellt. Auf der Nordseite ist die Paneltemperatur tiefer.

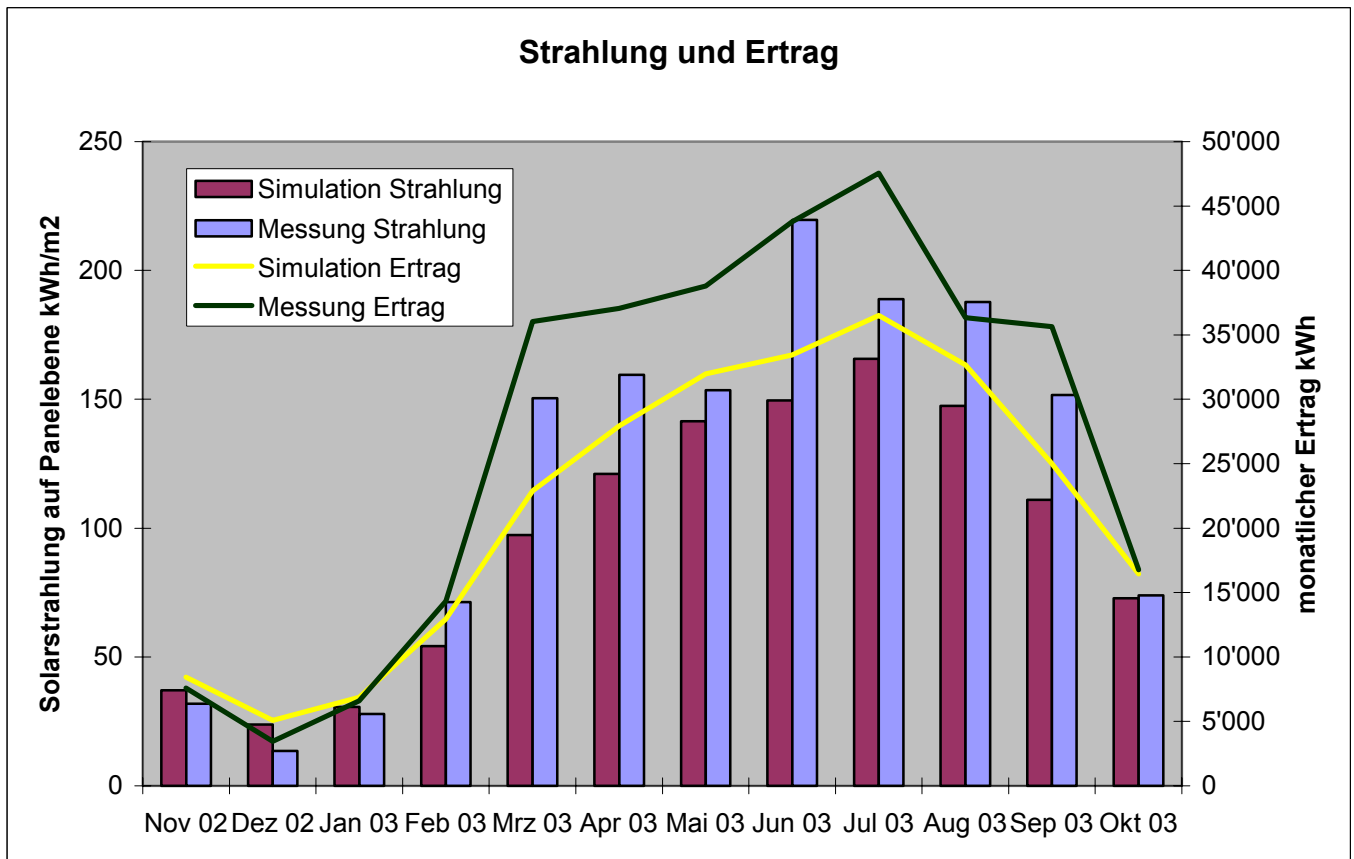


Bild 6: Ertrag und Vergleich mit Strahlung über ein Jahr. Die Abweichungen Strahlung und Ertrag sind teilweise auf ungleiche Ablese- resp. Erfassungszeitpunkte zurückzuführen.

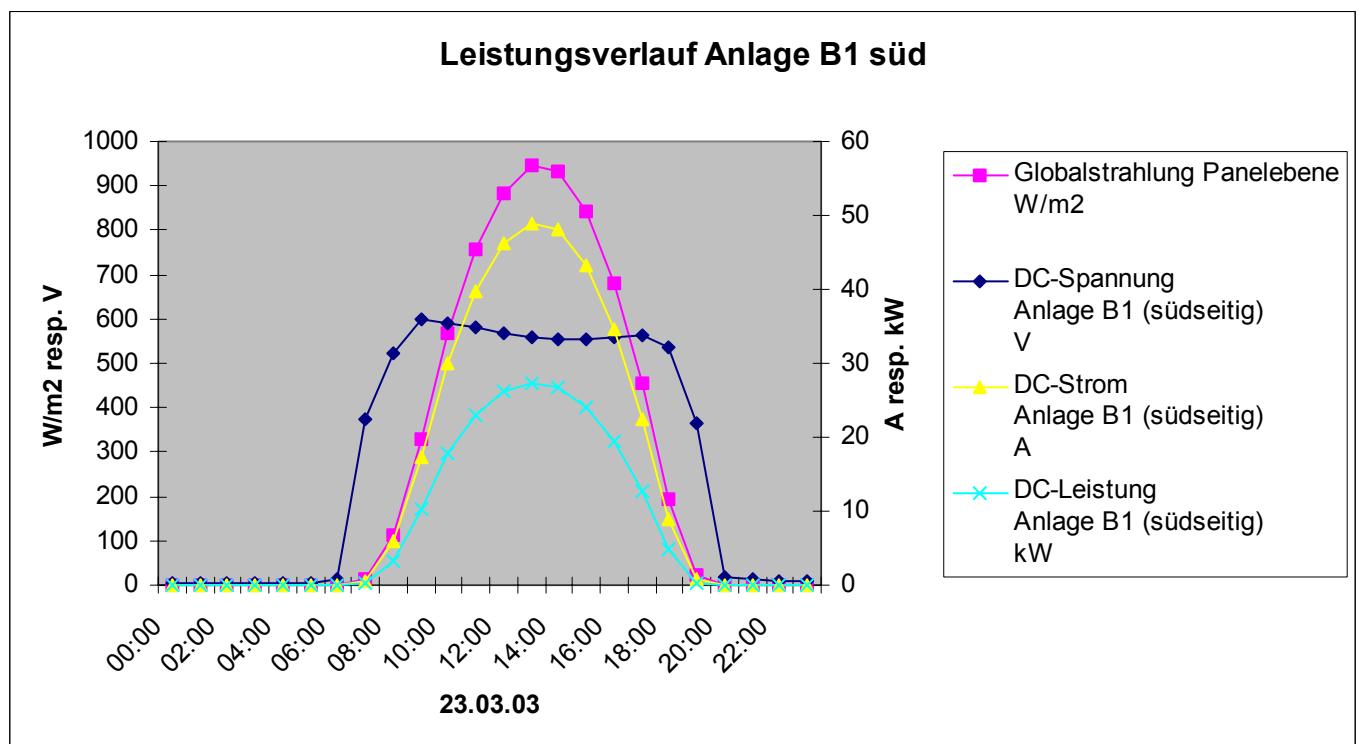


Bild 7: Tagesmessung einer Anlage im Frühjahr

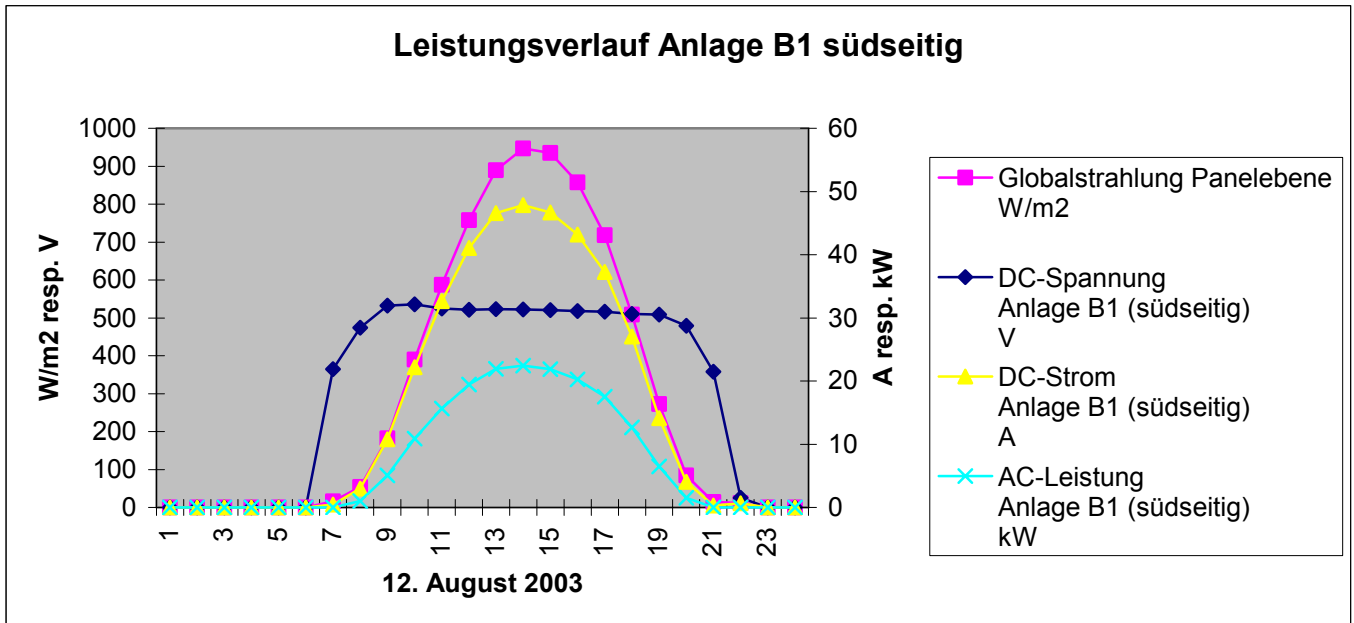


Bild 8: Messung des Leistungsverlaufes über einen Tag einer Unteranlage im Sommer.

4.3. Bewertung des Ertrages

Die PV-Anlage Dock E hat vom November 2002 bis Oktober 2003 (12 Monate) einen Ertrag von 323'906 kWh geliefert, was 24,5% über dem erwarteten Ertrag gemäss der Simulationsrechnung entspricht.

Damit wurde ein spezifischer Ertrag von 1144,5 kWh/kW (auf die Nennleistung von 283 kW bezogen) erreicht. Infolge des überdurchschnittlich schönen Wetters im Sommer 2003 muss dieser Wert korrigiert werden, um ihn mit anderen PV-Anlagen vergleichen zu können. Die Einstrahlung war um 24.1 % über den Werten, wie sie in die Simulationsrechnung einfließen und dem langjährigen Mittel entsprechen. Demzufolge ist der Ertrag genau um die höhere Einstrahlung höher und somit den Erwartungen entsprechend.

Gemäss Auskunft des EWZ (Elektrizitätswerk Zürich) lieferten die Solaranlagen in der Stadt Zürich, welche vom EWZ für die Solarstrombörse betrieben werden, im Sommer 2003 einen um 5% höheren Ertrag [5]. Dieser relativ bescheidene Mehrertrag könnte auf die hohen Temperaturen des Sommers 2003 zurückzuführen sein.

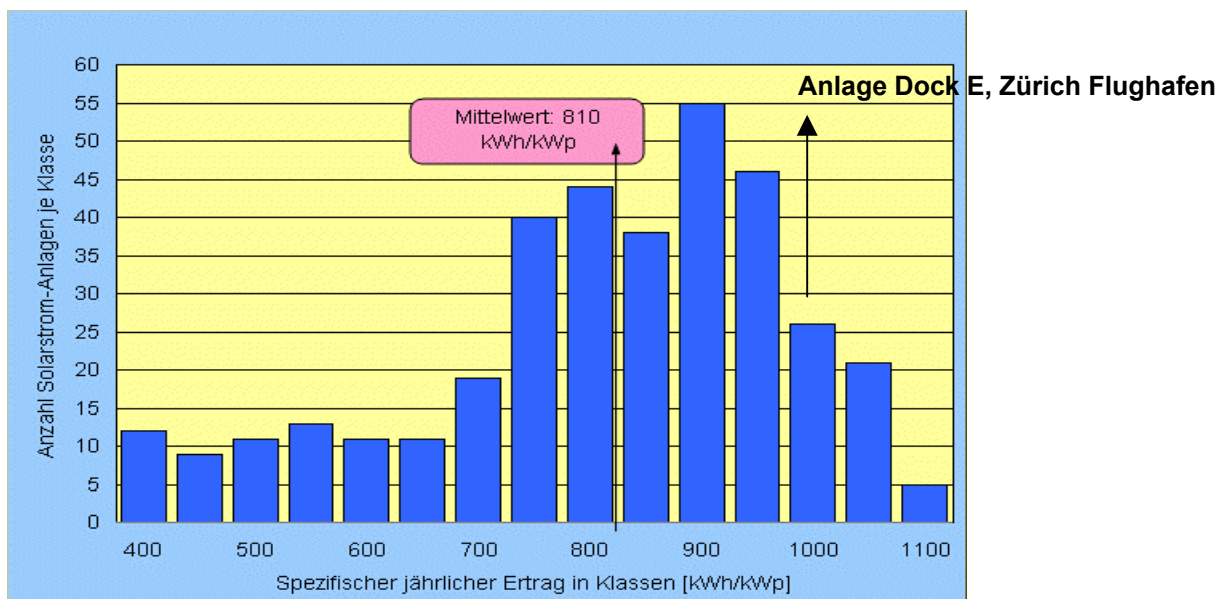


Bild 9: Statistik des spezifischen jährlichen Ertrags der PV-Anlagen in der Schweiz [6], eingezeichnet erwarteter Wert PV-Anlage Dock E

Infolge der hohen Temperaturen, aber auch der baubedingten Unterbrüchen der Stromversorgung, kann angenommen werden, dass in normalen Jahren der Ertrag der PV-Anlage Dock E höher als erwartet ausfallen wird. Es dürfte ein spezifischer Ertrag von knapp 1000 kWh/kW (auf die installierte Nennleistung von 283 kW bezogen) erreicht werden. Damit liegt diese Anlage deutlich über dem Schweizerischen Mittel von 810 kWh/kW.

4.4. Performance Ratio

Die Performance Ratio ist das Verhältnis der produzierten Energie zur eingestrahlt Energie, normiert mit der Anlagenleistung. Bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 (Normwert für die Anlagenleistung) müsste die Anlage also 283 kW liefern. Bei kleineren Einstrahlungen wird der Ertrag entsprechend linear weniger. Hier wird die monatliche Performance Ratio angegeben. Aus der gemessenen Globalstrahlung wird die monatliche „Vollbetriebsstundenzahl“ berechnet (= äquivalente Anzahl Stunden mit 1000 W/m^2). Daraus wird der maximal mögliche Ertrag berechnet (Vollbetriebsstunden mal 283kW), und mit dem effektiven monatlichen Ertrag verglichen.

Die durchschnittliche Performance Ratio übers Jahr liegt bei 79%. Dieser Wert beinhaltet die Verluste durch Teilbeschattung, Mismatch, Kabelverluste, Verluste durch Panelverschmutzung, Verluste durch Stromunterbrüche und Wechselrichterverluste. Ohne Stromunterbrüche würde er noch höher liegen.

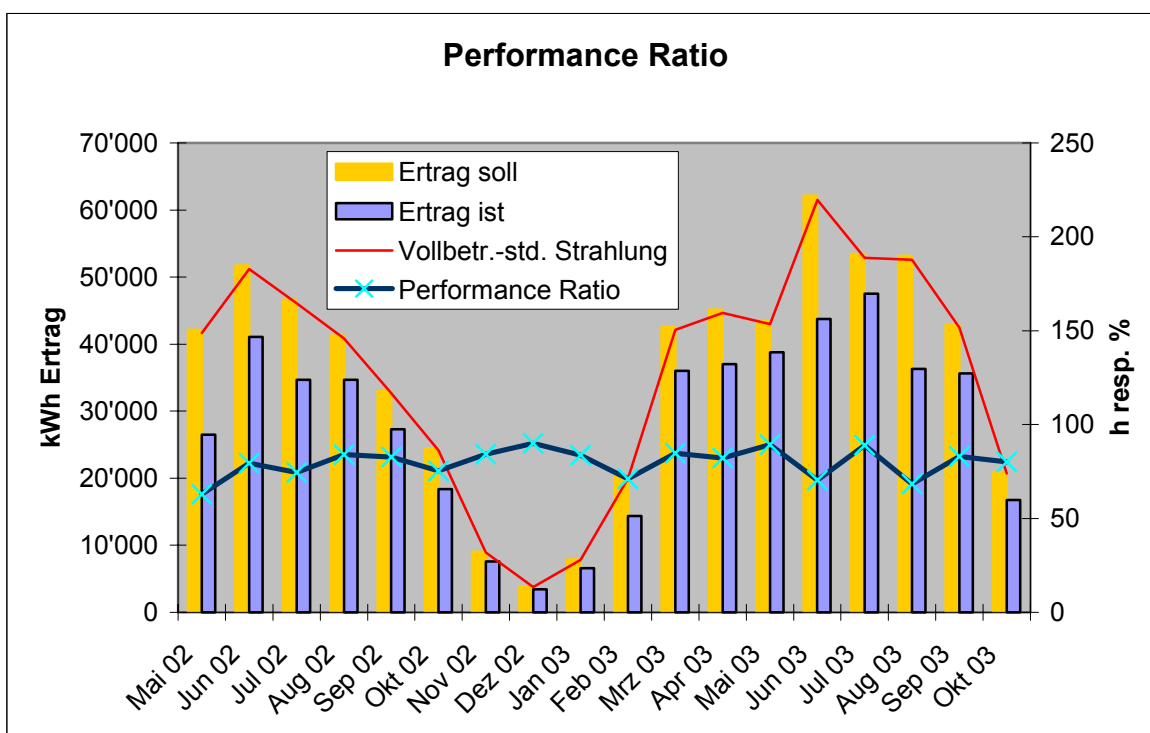


Bild 10: monatliche Performance Ratio. Die Schwankungen sind teilweise auch auf unterschiedliche Ableszeitpunkte des Ertrages zurückzuführen.

4.5. Bewertung der Beschattungswirkung und gestalterischen Einfügung ins Gebäude

Die Tatsache, dass die Anlage beim Schweizerischen Solarpreis 2002 die Auszeichnung HOMMAGE SOLAIRE in der Kategorie bestintegrierte Anlagen erhalten hat, beweist, dass auch die Gebäudeintegration optimal gelungen ist.

Die PV-Anlage stellt für das Gebäude auch ästhetisch einen Gewinn dar. Die Pergola macht aus dem sonst sehr einfach gestalteten Gebäude ein attraktives, nicht alltägliches Monument, welches seine Aufgabe zur Begrüssung der Fluggäste in der Schweiz optimal erfüllt.

Die Beschattungswirkung auf die Südfassaden konnte in diesem Sommer besonderes gut und positiv erlebt werden. Infolge der sehr guten Durchlüftung des Pergoladaches gibt es auch bei maximalem Sonnenschein keinerlei Stauwärme. Auch die begehbaren Terrassen auf dem 3. Obergeschoss (Lounge-Geschoss und Zuschauerbereich) werden beschattet, was auch im Sommer den angenehmen Aufenthalt ermöglicht.



Bild 11: Auch das Dach ist bewusst gestaltet und bildet die fünfte Fassade

Besonders hervorgehoben werden muss, dass die ganze Beschattung des Dock E ohne jede Beeinträchtigung des freien Ausblickes erfolgt, mit Ausnahme der Stirnseiten des ersten und zweiten Obergeschosses. Auf die Rollfelder, die umgebenden Hügel und die Natur, sowie bei klarem Wetter bis zu den Alpen und Jura-Ausläufern, ist die Sicht immer frei und ungetrübt. Ebenfalls wird so die Tageslichtnutzung nie beeinträchtigt, das Gebäude ist tagsüber hell und lichtdurchflutet.



Bild 12: Eine Anzeigetafel zeigt die momentane Leistung und den jährlichen Ertrag der Solaranlage und macht die Besucher des Zuschauerbereiches auf die PV-Anlage aufmerksam

Mit der Inbetriebnahme einer Anzeigetafel im Zuschauerbereich des Dock E sollen die Besucher über die Anlage informiert werden und können die aktuellen Produktionsdaten sehen. Der Flughafen Zürich ist eines der meistbesuchten Ausflugsziele in der Schweiz.

4.6. Wirtschaftliche Bewertung der Anlage

Die Anlage Dock konnte zu einem vergleichsweise sehr günstigen Preis realisiert werden. Dies hat einerseits mit der optimierten Konfiguration der Anlage und dem guten Preis für die gelieferten Solarlamellen zu tun. Hauptsächlich aber konnte das Ziel, dank Integration in den Bau Investitionskosten zu sparen, erreicht werden. Die Solarlamellen substituieren konventionelle Beschattungslamellen, deren Preis somit eingespart werden konnte. Die Kosten der Tragstruktur müssen ebenfalls nicht der Solaranlage angerechnet werden. Trotz etwas höherem Preis für die massgefertigten Solarlamellen konnte so eine Anlage gebaut werden, welche insgesamt nicht teurer als eine sehr günstige aufgeständerte Anlage mit Serienmodulen wurde. Der hohe Ertrag führt mit dazu, dass vergleichsweise tiefe Stromgestehungskosten von ca. 86 Rp./kWh erreicht werden (mit einer Verzinsung von 5.5% und 30 Jahren Amortisationszeit gerechnet).

5. Nationale / internationale Zusammenarbeit

Die PV-Anlage Dock Midfield ist auch Teil des europäischen Projektes PHOTOCAMPA: PV grid connected system in parking and roof, 5. EU-Rahmenforschungsprogramm, Forschungsprogramm 114, Themenfeld 523. Für dieses Programm werden 3 Unteranlagen nach ISPRA-Vorgaben gemessen. Die Projektleitung hat die Firma Windwatt SA, CH-1227 Genf, inne [4].

6. Referenzen / Publikationen

Beteiligte

- [1] Hubbuch M.: Professor für Energie- und Gebäudetechnik, Mitarbeiter ARGE ZAYETTA, **Hochschule Wädenswil**, Wädenswil
- [2] Gautschi T.: Bereichsleiter, Mitarbeiter ARGE ZAYETTA, **Amstein + Walthert AG**, Zürich
- [3] ARGE ZAYETTA: Generalplaner Dock E, **Martin Spühler, Architekt BSA SIA, Zürich; Angélil/Graham/Pfenninger/Scholl Architecture Ltd. Zürich und Los Angeles; Heyer Kaufmann Partner Bauingenieure AG, Zürich; Nicolet, Chartrand, Knoll Ltd, Montreal; Amstein + Walthert AG, Zürich**
- [4] **Windwatt SA**, Rue du Tir au Canon 4, 1227 Genève, mit **Zag Solar**, Amlehnstrasse 33, 6010 Kriens

Referenzen

- [5] **Mündliche Auskunft**, EWZ Zürich, 11. 2003
- [6] **Internetsite Photovoltaik: www.solarch.ch**, Rubrik „Energiestatistik“, 11. 2003

Publikationen

- [7] Hubbuch M., **Zwischenbericht Photovoltaikanlage Dock Midfield**, 2001, im Auftrag des BFE Bern.
- [8] Hubbuch M., **Zwischenbericht Photovoltaikanlage Dock Midfield**, 2002, im Auftrag des BFE Bern.
- [9] Spühler M. et al., **Werkbericht Dock Midfield**, ARGE ZAYETTA, 2002, Zürich.
- [10] Hubbuch M. et al., **Informationsflyer Photovoltaikanlage Dock Midfield**, 2002, im Auftrag unique Flughafen Zürich AG, ARGE ZAYETTA, 2001, Zürich.
- [11] unique Zürich Flughafen AG: **Homepage**, www.uniqueairport.com, 11. 2003