



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Swiss Federal Office of Energy

Programm

Aktive Sonnenenergienutzung, Photovoltaik

Pilotanlage 2 kWp für modulintegrierte Wechselrichter

ausgearbeitet durch

Prof. V. Crastan, R. Haldi

Hochschule für Technik und Architektur Biel

im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war die Erprobung des neuen 200 W-Modulwechselrichters MINISOL®200 in einer 2 kW-Pilotanlage, bestehend aus 10 Solarpanels (Laminate der Firma Solution, 206 Wp) mit integriertem Wechselrichter MINIGRID® (Entwicklung der Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Biel/ Sputnik Engineering AG, s. Schlussbericht DIS 2754). Die Solarmodule sind auf einer Betonfundamentreihe im Gelände des Solarlabors HTA/EW Biel montiert (Schaltanlage Mett).

Das Betriebsverhalten des integrierten Systems wird mit einem leistungsfähigen Messsystem dauernd überwacht. Dieses Messsystem liefert Daten mit einem Mess- und Speicherintervall von 3 s. Die im Datalogger gespeicherten Daten werden von einem PC in einem Intervall von 1 h übernommen und mit einem Analyseprogramm untersucht.

Hauptziel der Versuche war, die Zuverlässigkeit des entwickelten Wechselrichters zu testen und die Performanz der Anlage zu überprüfen. Darüber hinaus sollten mögliche Fehlfunktionen erkannt und Hinweise für eine Verbesserung des Inverters gewonnen werden.

Die Anlage und insbesondere der Wechselrichter zeigten eine erfreuliche Zuverlässigkeit und arbeiteten störungsfrei während der ganzen mehr als einjährigen Testzeit. Die Innen temperatur des Wechselrichters und jene des Elektrolytkondensators blieben innerhalb zulässiger und für die langfristige Zuverlässigkeit der Anlage annehmbarer Grenzen (s. Abschn. 3.4). Insofern hat sich der Wechselrichter bewährt.

Nicht befriedigen kann die *Performanz* der Anlage, die mit 58% als Jahresdurchschnitt bei teilweiser Beschattung (s. Abschn. 3.2), bzw. 61% ohne Beschattung, unter dem erwarteten Wert bleibt (s. Abschn. 3.1 bis 3.4). Der Hauptgrund liegt beim Solarpanel, das eine effektive Leistung bei Nennbedingungen von lediglich 90% des angegebenen Nennwerts erbringt und dessen relativer Wirkungsgrad unterdurchschnittlich ist. Auch beim Wechselrichter sind Verbesserungen möglich, vor allem durch bessere Einhaltung des MPP's, eventuell auch durch Erhöhung des Wirkungsgrades, dessen mittlerer Jahreswert 84% beträgt. Dieser kann durch Optimierung des leistungselektronischen Konzeptes und der Konstruktion erhöht werden. Der entsprechende Weiterentwicklungsaufwand ist bei genügender Marktnachfrage sinnvoll. Eine detaillierte Analyse der Performanz findet man in Abschn. 3.5.

Abstract

The aim of the project has been to test the new 200 W-module-integrated inverter MINI-SOL®200 for direct 230 V-grid coupling. The installed PV-system consists of 10 solar panels (laminate of the firm Solution, 206 Wp) with integrated inverter MINIGRID® (developed by the Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Biel/Sputnik Engineering AG, see the end report DIS 2754). The solar modules were mounted on a concrete fundament range in the field of the solar laboratory of the HTA Biel/ Energy Services of the city of Biel (switchgear Mett).

The operation of the integrated system has been observed by a powerful monitoring system. This systems collects data with a measure and storing interval of 3 s. The data stored in a datalogger are recorded and analyzed with 1 h samples in a PC.

The main goals of the test were to check the reliability of the inverter, the performance of the system and to recognize possible disfunctions of the inverter and get information in order to optimize construction data.

The system and the inverter have shown a very good reliability and worked without any perturbation during the whole test period of more than one year. The internal temperature of the inverter and the temperature of the electrolytic condenser remained into limits which are acceptable for the long term reliability (life time) of the inverter (paragraph 3.4). The inverter stands so far the test.

The yearly mean performance of the system is 58%, measured value with shadows cast by towers of a new high voltage overhead transmission line since July 1999 (paragraph 3.2) Without shadow, the performance is 61% (paragraph 3.1 to 3.4) and so not satisfactory at all. The principal reason of this low performance is the solar panel itself, his effective power being only 90% of the given nominal power and the mean relative efficiency below average. Also the inverter can be improved, first by better keeping of the MPP through hard- (measure) and software-optimization of the tracking system and second by improving the efficiency, whose measured yearly average value was 84%. This can be obtained by optimization of the power electronic concept and of the construction. A sufficient rise in demand would justify further development costs. A detailed analysis of performance can be found in paragraph 3.5

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	5
1. Ziel der Arbeit	6
2. Beschreibung der Anlage	6
2.1 Gesamtanlage	6
2.2 Messgeräte und Messschaltung	6
3. Messungen, Resultate	10
3.1 ESTI-Auswertung für die Periode November 1998 bis Februar 2000	10
3.2 Vergleich der 10 Wechselrichter	11
3.3 Vergleich von Wechselrichter 9 und 10	12
3.4 Auswertung für das Kalenderjahr 1999	12
3.5 Performanz	14
3.5.1 Wirkungsgrad des Wechselrichters	15
3.5.2 Fehlanpassung des Trackers	15
3.5.3 DC-Performanz des Panels	16
3.5.4 Mögliche Performanzverbesserungen	17
3.6 Weitere Graphiken	18
3.6.1 Häufigkeit von Einstrahlung und Temperaturen	18
3.6.2 Typischer Tagesgang bei voller Einstrahlung	18
4. Schlussfolgerungen	18
Anhang (Beilagen 1 bis 12)	19

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

1. Ziel der Arbeit

Modulintegrierte Solarwechselrichter für direkten Netzanschluss 230 V sind sowohl für fassadenintegrierte Anlagen als auch für Do it yourself-Anwendungen von Interesse. Im Auftrage des Bundesamtes für Energie wurde von der Berner Fachhochschule, HTA Biel, zusammen mit Sputnik Engineering und Atlantis Energie ein Modulwechselrichter für 200 W entwickelt (BEW Projekt DIS 2754, Schlussbericht November 1996).

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Erstellung einer Pilotanlage zur Erprobung dieses Konzeptes. Die Anlage besteht aus 10 Solarpanels (Laminate der Firma Solution, 206 Wp) mit integriertem Wechselrichter (Entwicklung HTA Biel/Sputnik Engineering AG). Die Solarmodule sind auf einer Betonfundamentreihe im Gelände des Solarlabors HTA/EW Biel montiert (Schaltanlage Mett). Das Betriebsverhalten des integrierten Systems wurde mit einem leistungsfähigen Messsystem dauernd überwacht. Dieses Messsystem liefert Daten mit einem Mess- und Speicherintervall von 3 s. Die im Datalogger gespeicherten Daten werden von einem PC in einem Intervall von 1 h übernommen und mit einem Analyseprogramm untersucht.

Hauptziel der Versuche war, die Zuverlässigkeit des entwickelten Wechselrichters und die Leistungsfähigkeit der Anlage zu testen. Darüber hinaus sollten mögliche Fehlfunktionen erkannt und Hinweise für eine Verbesserung der Inverterkonstruktion gewonnen werden.

2. Beschreibung der Anlage

2.1 Gesamtanlage

Der Aufbau der Anlage bestehend aus 10 Solargeneratoren mit Modulwechselrichter, Messinstrumenten, Datalogger und PC, ist in der Abb. 1 dargestellt. Die Neigung der nach Süden ausgerichteten Panel ist 45° und konstant. Der ESTI-Sensor sowie der gekapselte Sensor für die Lufttemperaturmessung befinden sich zwischen den Modulen 9 und 10, welche in der Nähe des Messlokals stehen (s. auch Photo in Abb. 2). Die restlichen 8 Module sind in etwa 32 m Entfernung südlich davon montiert (Photo in Abb. 3, oben Module 1,3,5,7, unten 2,4,6,8) und seit Juli 1999 einer Beschattung durch Hochspannungsmaste ausgesetzt. Für Aufbau, Eigenschaften und Steuerung der Modulwechselrichter sei auf Schlussbericht DIS 2754 verwiesen.

2.2 Messgeräte

Die ins Netz eingespeiste Wechselstromleistung wurde mit zwei verschiedenen Gerätetypen gemessen. Für die Erfassung der Wirkleistungen der Wechselrichter Nr. 1...9 kamen drei dreiphasige Universalwattmeter UPM 3000 zum Einsatz, bei welchen die Leistungsaufnahme der Wechselrichter bei fehlender Einstrahlung zwar negativ angezeigt, aber vom Datalogger auf Null gerundet wurde.

Die Messung der Wirkleistung des Wechselrichters Nr. 10 erfolgte mit einem genaueren Vektor-Wattmeter, wobei hier die Leistungsaufnahme bei fehlender Einstrahlung vom Datalogger als negativer Wert übernommen wurde.

Die in der Abb. 1 dargestellten Messkomponenten sind in Tabelle 1 näher beschrieben, mit Angabe des Messbereichs und der Genauigkeit.

Der Datalogger hat eine Grundgenauigkeit von +/- 0.1% vom Messwert (v. Mw.), welche zusätzlich berücksichtigt werden muss. Die 4 Messwandler M1... M4 sowie das Wattmeter W4 haben jeweils ein Ausgangssignal von 4 .. 20 mA, welches mit einem direkt beim Datalogger-

eingang sich befindenden Widerstand von 100 Ohm +/- 0.1% in eine Gleichspannung umgesetzt wird. Dadurch ergibt sich z.B. bei der Erfassung der ins Netz abgegebenen Wirkleistung von Modul 10 (Pac10) folgender max. Gesamtmeßfehler: +/- 0.4% v. Mw. (W4: +/- 0.2%, Widerstand: +/- 0.1% v. Mw., Datalogger: +/- 0.1% v. Mw.)

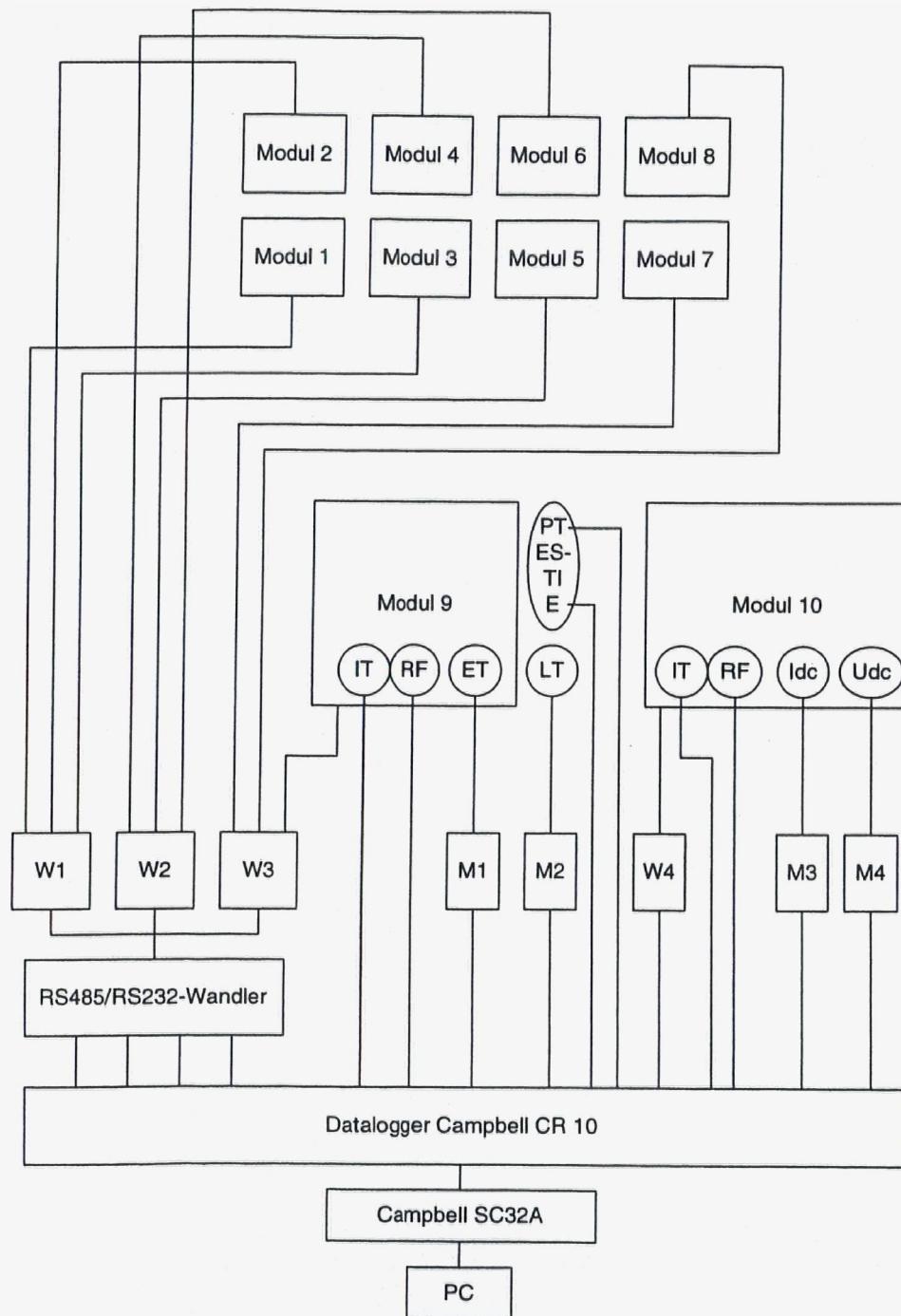


Abb. 1: Anordnung der Komponenten der Pilotanlage: Module 1 ...10 mit insgesamt 2 kWp:
 W₁..W₃: Dreiphasenwattmeter, W₄: Vektor-Wattmeter, M₁, M₂ : Messwandler für Temperatur, M₃, M₄: Messwandler für Gleichspannung bzw. Gleichstrom, ESTI-Sensor für Paneltemperatur (PT) und Einstrahlung (E), IT: Sensor für Innentemperatur, RF: Sensor für Innenluftfeuchte, ET: Temperatursensor für Elektrolytkondensator

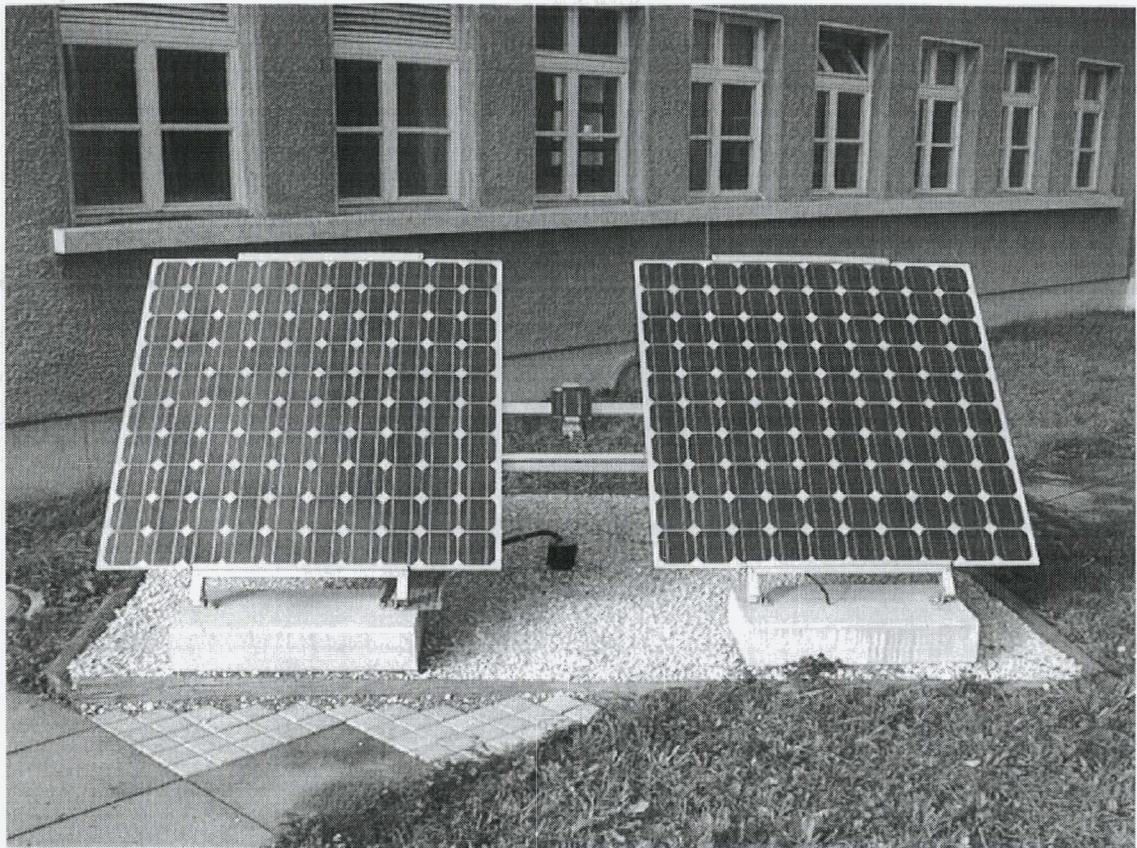


Abb. 2: Module 9 (rechts) und 10 (links), in der Mitte der ESTI-Sensor

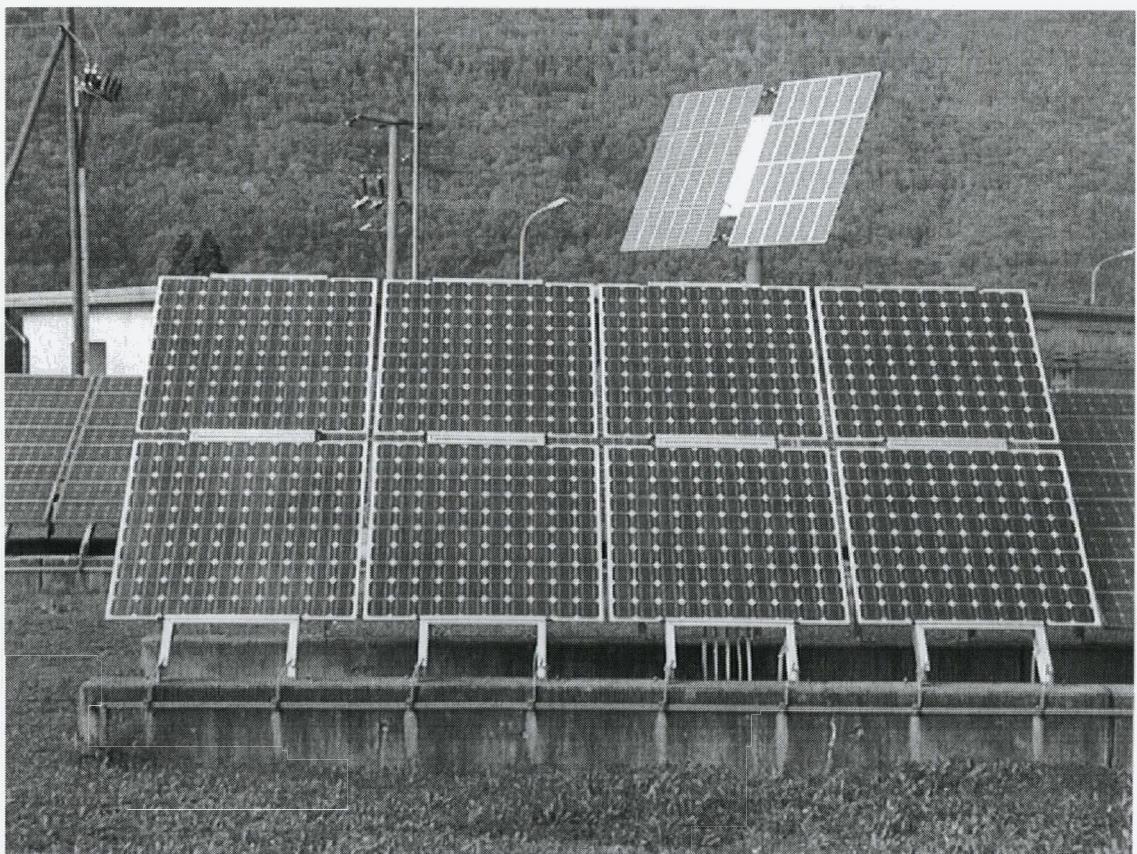


Abb. 3: Module 1....8, von rechts nach links: oben 1, 3, 5, 7, unten 2, 4, 6, 8

Tabelle 1: Legende zu den Komponenten der Pilotanlage 2kWp für modulintegrierte Wechselrichter

Abkürzung	Erläuterungen	Fabrikat	Typ	Messbereich	Messfehler
E	Sensor zur Erfassung der Einstrahlung in Panelebene	ESTI	kombiniert	Keine Daten	ca. +/- 2% v. Mw.
ESTI	Kombinierter Sensor für Einstrahlung und Paneltemperatur	ESTI	siehe E, PT	siehe E, PT	siehe E, PT
ET	Temperatursensor am Gehäuse des Elektrolytkondensators	3 Leiter	Pt 100, Kl. B	0...100°C	ca. +/- 0,8°C
Idc	Shunt für die Messung vom Panel-Gleichstrom	SE	6A/60mV	0...6A	ca. +/- 0,5% v. Mw.
IT	Sensor zur Erfassung der Innenlufttemp. des Wechselrichters	Rotronic	HP101A	"-20...+60°C	ca. +/- 0,6°C
LT	Gekapselter Sensor für die Lufttemperatur der Umgebung	3 Leiter	Pt 100, Kl. B	"-50...(+120)°C	ca. +/- 0,6°C
M1	Messwandler für Pt 100 (3 Leiter)	MOSTEC	TLC	0...+150°C	ca. +/- 0,1% v. Mw.
M2	Messwandler für Pt 100 (3 Leiter)	MOSTEC	TLC	"-30...+50°C	ca. +/- 0,1% v. Mw.
M3	Messwandler für Gleichspannung	Orbit Controls	OC35-DC	0...60mVDC	ca. +/- 0,1% v. Mw.
M4	Messwandler für Gleichspannung	Orbit Controls	OC35-DC	0...120VDC	ca. +/- 0,1% v. Mw.
Modul 1...8	8 Solarmodule mit modulintegrierten Wechselrichtern	Atlantis	MINISOL200		
Modul 9+10	2 Solarmodule mit modulintegrierten Wechselrichtern	Atlantis	MINISOL200		
PT	Sensor zur Ermittlung der Paneltemperatur	ESTI	kombiniert	Keine Daten	ca. +/- 1°C
RF	Sensor zur Erfassung der Innenluftfeuchte des Wechselrichters	Rotronic	HP101A	0...100% rel. Feuchte	max. +/- 2,5% r.F.
Udc	Erfassung der Panel-Gleichspannung (direkt)				
W1	Dreiphasen-Wattmeter für Wechselstromleistung	Stationenbau	UPM3000	nom. 1150 W/Phase	ca. +/- 1% v. Mw.
W2	Dreiphasen-Wattmeter für Wechselstromleistung	Stationenbau	UPM3000	nom. 1150 W/Phase	ca. +/- 1% v. Mw.
W3	Dreiphasen-Wattmeter für Wechselstromleistung	Stationenbau	UPM3000	nom. 1150 W/Phase	ca. +/- 1% v. Mw.
W4	Einphasiges Vektor-Wattmeter für Wechselstromleistung	MOSTEC	M9428A	nom. 300W	ca. +/- 0,2% v. Mw.

3. Messungen, Resultate

Die Anlage wurde im März 1998 mit dem Netz gekoppelt. Nach einigen Verzögerungen, die vor allem mit der Mess-Software zusammenhingen (s. Jahresbericht 1998), konnte im Oktober 1998 mit den systematischen Messungen begonnen werden. Im Jahresbericht 1998 wurden die Messwerte von November 1998 vorgestellt. Der Jahresbericht 1999 enthält eine summarische Auswertung der Messperiode vom 01.12.98 bis 30.11.99 sowie einige Hinweise zur Temperatur des Elektrolytkondensators im WR 9 und zum Problem der Teilbeschattung durch neuerstellte Freileitungsmaste, illustriert mit den Tagesverläufen vom 03.07.99 und 27.07.99.

Im März 2000 lieferte das Universalwattmeter UPM 3000, welches die Wirkleistungen der drei Wechselrichter Nr. 1 ... 3 erfasste, z.T. falsche Werte und musste ersetzt werden (April 2000). Es war vorgesehen, die Messungen bis zum 30.06.00 weiterzuführen. Im April 2000 begann leider die Festplatte, welche die Messdaten des Dataloggers aufzeichnete, nicht mehr richtig zu arbeiten. Im Mai 2000 erfuhren wir vom Datenrettungsspezialisten, dass wegen der schweren physikalischen Beschädigung der Oberfläche keine Daten gerettet werden können. Wir verfügen deshalb zwar bis Ende Februar 2000 über korrekte und lückenlose Daten, nicht aber über die geplanten sehr detaillierten Messdaten aller Panel. Die nachfolgenden Resultate beruhen auf Messungen von November 1998 bis Februar 2000.

3.1 ESTI-Auswertung für die Periode November 1998 bis Februar 2000

Die wichtigsten kumulierten bzw. gemittelten Größen sind in Tabelle 2 dargestellt. Sie umfassen die mittlere Lufttemperatur, die eingestrahlte Energie, die Energieproduktion (gemäss ESTI ab 50 W/m²) und die sich daraus ergebende Performanz der Gesamtanlage.

Tabelle 2: Mittlere und kumulierte ESTI- Daten über die Messzeit

Monat	Jahr	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Einstrahlung E [kWh/m ²]	Energieproduktion Anlage W [kWh]	Performanz Anlage [%]
November	1998	2,3	53,5	51,4	46,6
Dezember	1998	-0,2	37,6	28,6	36,9
Januar	1999	1,1	44,9	41,4	44,7
Februar	1999	-0,3	52,9	51,6	47,3
März	1999	5,6	95,4	128,3	65,2
April	1999	9,2	107,5	144,0	65,0
Mai	1999	16,3	130,5	167,2	62,1
Juni	1999	16,8	141,1	182,6	62,8
Juli	1999	20,5	156,3	192,4	59,7
August	1999	19,4	135,4	161,9	58,0
September	1999	17,3	115,9	139,0	58,2
Oktober	1999	9,3	67,7	72,7	52,1
November	1999	2,5	28,7	21,8	36,8
Dezember	1999	1,8	33,8	29,6	42,4
Januar	2000	0,0	37,5	33,6	43,4
Februar	2000	3,6	68,7	76,1	53,7

Die produzierte Wirkleistung der gesamten Anlage entspricht der Summe der Leistungen der zehn Wechselrichter. Sie weist nachts einen kleinen negativen Wert auf, welcher vom Leistungsbezug des Wechselrichters Nr. 10 herröhrt (s. Bemerkung in Abschn. 2.2). Bei der

Interpretation dieser Daten sind die in den Abschnitten 3.2 und 3.3 erwähnten verfälschenden Faktoren angemessen zu berücksichtigen.

Hervorzuheben ist die sehr gute *Betriebssicherheit* der Anlage, die keine Ausfälle verzeichnete. Die *Performanz* ist hingegen unbefriedigend. Der maximal gemessene monatliche Wert bei günstiger Lufttemperatur (März, April, noch ohne Beschattung) ist rund 65%. Als Jahresdurchschnitt erhält man (bei teilweiser Beschattung) lediglich 58%. Die weitgehend unbeschatteten Panels 9 und 10 weisen eine höhere Jahresperformanz von im Mittel 61 % bei gleichbleibender maximaler Monatsperformanz von ca. 65% auf. Eine nähere Analyse erfolgt in den Abschn. 3.2, 3.4 und 3.5.

3.2 Vergleich der 10 Wechselrichter

Wegen der Zerstörung der PC-Festplatte konnten die Detaildaten der Wechselrichter 1 bis 8 der letzten Monaten nicht mehr rekonstruiert werden. Der Vergleich beschränkt sich somit auf die einjährige Periode Januar bis Dezember 1999 und wird in der Beilage 1 wiedergegeben. Die Tabelle zeigt die ins Niederspannungsnetz 230 Vac abgegebenen Energieanteile aller 10 Wechselrichter sowie die totale Energieproduktion der Anlage.

Im Juli 1999 wurden in unmittelbarer Nähe der Solarmodule für eine Hochspannungs-freileitung der BKW/SBB drei Hochspannungsmaste errichtet, welche seit dem 21. Juli jeweils vormittags abwechslungsweise die Module 1 bis 8 beschatten. Um die Produktionseinbusse durch diesen Schattenwurf zu beurteilen, wurden zwei gut besonnte Tage im Monat Juli analysiert (s. Jahresbericht 1999). Im Tagesmittel ergibt sich bei den beschatteten Modulen eine Ertragseinbusse von 6%...8%. Die Gesamtproduktion der Anlage erleidet an den betreffenden Tagen eine Einbusse von etwas mehr als 5%.

Die DC-Nennleistung aller 10 Solarmodule beträgt 2.06 kWp (nach Herstellerdaten). In der obenerwähnten einjährigen Messperiode erzielte man bei 45° Neigung und südlicher Ausrichtung eine höchste Tageseinstrahlung von 7.200 kWh/m² am 25. Juli 1999. Die tiefste Einstrahlung resultierte am 19. November 1999 mit nur 0.085 kWh/m².

Der niedrigere Wert des Wechselrichters WR10 in Beilage 1 ist auf den Leistungsbezug des Transformators in der Nacht zurückzuführen. Nach Abschn. 3.3 beträgt dieser 6.9 kWh/a oder $6.9/0.2062 = 33.5 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{kWp})$. Die mit den übrigen Wechselrichtern zu vergleichende Leistung beträgt deshalb für WR10 → 670.1 kWh/a.

Mit dieser Korrektur und unter Berücksichtigung, dass im 1. Halbjahr die Module 1...8 noch unbeschattet waren, im 2. Halbjahr hingegen ihre Energieproduktion durch die neuerstellten Hochspannungsmaste beeinträchtigt wurde, ergibt die Auswertung der Beilage 1 folgende Resultate:

- Die Produktion der Module 1...8 beträgt durchschnittlich 641.7 kWh/kWp, was einer Performanz von 57.7% entspricht. Die Abweichungen sind + 2.9% beim besten und -3.7% beim schlechtesten Modul.
- Die Produktion der unbeschatteten Module 9 und 10 ist im 2. Halbjahr gegenüber dem 1. Halbjahr trotz Berücksichtigung des Einstrahlungsunterschieds um 5% geringer.
- Die Produktion der Module 1...8 ist im 2. Halbjahr gegenüber dem 1. Halbjahr bei Berücksichtigung des Einstrahlungsunterschieds um 9% geringer. Dies weist daraufhin, dass die Beschattung im Mittel zu einer Minderleistung von etwa 4% führt.
- Die Produktion der Module 9 und 10 ist durchschnittlich 679.6 kWh/kWp, was einer Performanz von 61% entspricht (rund 60% für Modul 10 und 62% für Modul 9). Sie produzieren rund 4% mehr Energie im 1. Halbjahr und rund 8% mehr Energie im 2. Halbjahr als die Module 1...8. Die Mehrproduktion von 4% ist auf den besseren Standort (besserer Horizont), die Erhöhung auf 8% im 2. Halbjahr auf die Minderleistung der Module 1...8 wegen Beschattung zurückzuführen.

3.3 Vergleich der Wechselrichter 9 und 10

Die Wechselrichter (WR) 9 und 10 wurden exakt ausgemessen und verglichen. Für das Kalenderjahr 1999 ergeben sich folgende Energie-Verhältnisse bei Aufsummierung aller 8760 Stundenwerte (also nicht nach ESTI) und Berücksichtigung, dass das Wattmeter von WR 10 auch den nächtlichen Leistungsbezug erfasst (s. Abschn. 2.2):

Produktion WR 9 (ohne Leistungsbezug):	144,987 kWh
Produktion WR 10 (mit Leistungsbezug):	134,032 kWh
Netzbezug WR 10 (Trafo-Leerlaufverluste):	6,886 kWh
Produktion WR 10 (ohne Leistungsbezug):	140,918 kWh

Ohne Leistungsbezug stimmt die produzierte Jahresenergie der beiden Wechselrichter 9 und 10 bis auf knapp 3% überein. Die Berechnung zeigt ferner, dass durch die Unterdrückung der nächtlichen Leistungsaufnahme (Trennung des Trafos) die Energieeinspeisung von Wechselrichter 10 im Jahresmittel um etwa 5,1% verbessert wird. Ohne diese Trennung reduziert sich demzufolge die Performanz der Wechselrichter 9 und 10 von 61% auf 58%.

Zwecks Überprüfung der beiden Wattmetertypen sowie der effektiven Leistungsproduktion der Wechselrichter 9 und 10 wurden während 21 Tagen (04.03.00 bis 24.03.00) die Wattmeter vertauscht. Die mittlere Leistung von WR 9 erreichte dabei 25.04 W bei Vernachlässigung des Leistungsbezugs. Die mittlere Leistung von WR 10 ergab hier 24.74 W (Leistungsbezug vom Datalogger unterdrückt). Der Vergleich zeigt, dass wiederum der WR 9 etwas mehr produziert, wobei die Differenz aber nur noch ca. 1% beträgt. Die Unterschiede ohne und mit Vertauschung der Wechselrichter sind auf die ungenauere Leistungsmessung durch das Universalwattmeter WR9 zurückzuführen (Genauigkeit $\pm 1\%$), welches offensichtlich eine um ca. 1% zu große Leistung misst. Daraus ergibt sich, dass Panel 9 etwa 2% mehr Leistung als Panel 10 produziert.

3.4 Auswertung für das Kalenderjahr 1999

Die kumulierten ESTI-Daten entsprechend Tabelle 2 sind für die Gesamtanlage:

Mittlere Lufttemperatur = 10,1°C

Einstrahlung in Panelebene = 1'110,1 kWh/m²

Energieproduktion der Anlage = 1'332,5 kWh

Jahresperformanz der Anlage = 58,2%

Für die Panel 9 und 10, die (ausser im Winter morgens) keinerlei Beschattung unterworfen sind, erhält man:

Energieproduktion (nach ESTI) WR9 + WR10 = 280.3 kWh

Jahresperformanz = 61.2%

Weitere Messergebnisse können folgendermassen zusammengefasst werden:

Einstrahlung: Die eingestrahlte Jahresenergie in der Paneelebene (45° gegenüber der Horizontalen geneigt und nach Süden gerichtet) erreichte bei Berücksichtigung aller 8760 Stundenwerte 1129.8 kWh/m² oder 1110.1 kWh/m² gemäss ESTI-Auswertung. Der höchste Stundenmittelwert der Einstrahlung betrug 1'041 W/m² und trat am 19.08.99 auf.

Paneltemperatur: Der Jahresmittelwert, welcher vom ESTI-Sensor ermittelt wurde, ergab 13.0°C. Der tiefste Stundenmittelwert resultierte am 13.02.99 mit -13,7°C. Der höchste Stun-

denmittelwert erreichte 60,4°C am 04.07.99 (Lufttemperatur über 35°C). Für die Häufigkeitsverteilung s. Abb. 4 und Abschn. 3.6.

Lufttemperatur: Hier betrug der Jahresmittelwert 10,1°C mit einem minimalen Stundenmittelwert von -13,6°C am 12.02.99 und einem maximalen Stundenmittelwert von 35,4°C am 04.07.99 (kurzzeitig 36,5°C). Für die Häufigkeitsverteilung s. Abb. 4 und Abschn. 3.6.

Elkotemperatur: Die Gehäusetemperatur des Elektrolytkondensators im WR 9 wies einen Jahresmittelwert von 15,5°C auf. Am 12.02.99 ergab sich ein Minimalwert von -15,3°C, am 29.07.99 ein Maximalwert von 69,6°C. Die Häufigkeitskurve Abb. 4 zeigt, dass eine Temperatur von 50°C nur während ca. 4% der Zeit überschritten wird. Die Wahl der Elektrolytkondensatoren stellt deshalb keine besonderen Probleme.

Wechselrichtertemperatur: Der Jahresmittelwert der Innentemperatur lag bei WR 9 bei 13,0°C, bei WR10 bei 13,1°C. Der minimale Stundendurchschnitt betrug -13,5°C bei WR 9 und -13,3°C bei WR 10 (jeweils am 12.02.99). Das maximale Stundenmittel erreichte 56,0°C im WR 9 und 54,5°C im WR 10 (am 04.07.99). Die vom Datalogger erfassten kurzzeitigen Temperaturmaxima liegen etwa 0,5°C höher als die Stundendurchschnittswerte und erreichen somit maximal 56,5°C (Häufigkeitsverteilung s. Abb. 4).

Zeitlich gesehen, erreicht die Temperatur des Elektrolytkondensators und des Wechselrichters ihr Maximum etwa eine Stunde nach dem Einstrahlungshöchstwert, während die maximale Lufttemperatur üblicherweise erst ca. 2 Stunden nach dem Einstrahlungshöchstwert auftritt.

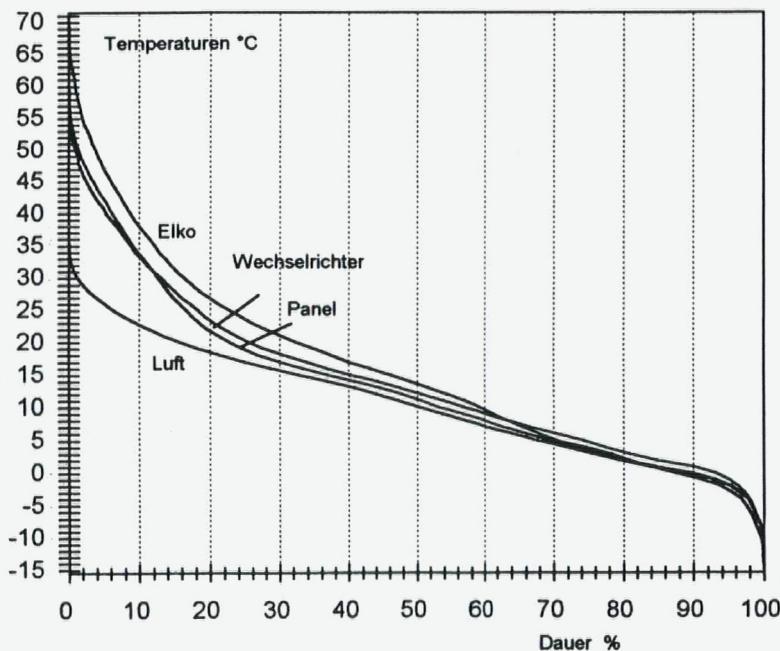


Abb. 4: Dauerlinie von Lufttemperatur, Paneltemperatur, Wechselrichterinnentemperatur und Gehäusetemperatur des Elektrolytkondensators

Wechselrichterfeuchtigkeit: Die mittlere relative Feuchtigkeit bezifferte sich bei WR 9 auf 45,1% und bei WR 10 auf 47,3%. Die minimale Luftfeuchtigkeit betrug 30,3% bei WR 9 am 03.08.99 und 29,7% bei WR 10 am 04.07.99. Die höchste Luftfeuchtigkeit erreichte 72,3% bei WR 9 am 30.01.99 und 75% bei WR 10 am 24.02.99. Die vom Datalogger erfassten kurzzeitigen Feuchtemaximas sind höchstens 3% höher als die Stundendurchschnittswerte und erreichen somit maximal 76% relative Feuchte.

3.5 Performanz

Als Performanz PR definiert man das Verhältnis der Benutzungsdauer der Nennleistung h_w zur Dauer h_E der Nenn-Einstrahlung von 1000 W/m^2 in der Paneelebene für die betrachtete Periode

$$PR = \frac{h_w}{h_E} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} h_w &= \frac{W}{P_N} \left[\frac{\text{kWh/Periode}}{\text{kW}} \right] \\ h_E &= \frac{E}{1} \left[\frac{\text{kWh/(m}^2 \cdot \text{Periode)}}{\text{kW/m}^2} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Die Benutzungsdauer ist 1999 nach ESTI ohne nächtliche Leistungsaufnahme für die Gesamtanlage 649 h/a und die Dauer der Einstrahlung 1110h/a. Die unbeschatteten Panels 9 und 10 weisen im Mittel eine Benutzungsdauer von 680 h/a auf. Die mittlere Jahresperformanz dieser Panel liegt so bei 61% (60% für WR10 und 62% für WR9).

Die Performanz der Anlage kann auch unterteilt werden in

$$\begin{aligned} PR &= \frac{W}{W_{DC}} \frac{W_{DC}}{W_{DCMPP}} PR_{DC} = \eta_w \eta_{Tr} PR_{DC} \\ PR_{DC} &= \eta_r F_n \end{aligned} \quad (2)$$

Die drei Faktoren der Performanz sind: der mittlere Wirkungsgrad des Wechselrichters η_w , der mittlere Wirkungsgrad des Tracking η_{Tr} (welcher die Güte der Einhaltung des MPP-Punktes widerspiegelt) und die Performanz des Panels, bezogen auf den Betrieb im MPP. Letztere, setzt sich aus dem mittleren relativen Wirkungsgrad η_r des Panels und der Fehleinschätzung (bzw. Toleranz) F_n der Nennleistung zusammen.

Eine exakte Unterteilung der Faktoren aller Panel konnte leider wegen der Vernichtung der Detaildaten auf der Festplatte nicht vorgenommen werden. Neue Messungen während einiger weiterer Monate wurden von der Programmleitung nicht bewilligt. Aus den geretteten Daten und aus zusätzlichen Messungen während der Betriebsdauer können dennoch folgende Schlüsse gezogen werden. Sie basieren auf den sehr genauen Messungen von Panel 10. Die Vergleiche in den Abschn. 3.2 und 3.3 lassen jedoch den Schluss zu, dass sie auch für die Anlage als ganzes gültig sind.

Die Auswertung der monatlichen Performanz für Panel 10 zeigt Abb. 5. Daraus folgen eine mittlere Jahresperformanz von 60.5%, ein mittlerer Wechselrichterwirkungsgrad von 84% und eine mittlere DC-Performanz × Fehlanpassung des Trackers von 72%. Die maximale Performanz von etwa 66% tritt im Monat März auf mit einem mittleren Wechselrichterwirkungsgrad von 84.5% und einer DC-Performanz × Fehlanpassung von 78%.

Die Performanz der Sommermonate ist nach Tabelle 2 und Abb. 5 deutlich kleiner als 65%. Sie wird verursacht durch die höhere Temperatur, welche vor allem den Panelwirkungsgrad verringert (Beilage 3).

Der Einbruch der Performanz in den Wintermonaten (Tabelle 2, Abb. 5) hat verschiedene Ursachen: Schnee, ungünstige Horizontlinie, die zu einer zusätzlichen Beschattung durch ein Hochhaus und einen weiteren Turm führt (diese wirkt sich im Winter auch auf die Panel 9 und 10 aus), Absinken des Wirkungsgrades von Panel und Wechselrichter bei kleiner Einstrahlung Beilagen 2 und 3).

Von Bedeutung ist schliesslich für die effektive Performanz der Anlage, wie in Abschn. 3.3 ausgeführt, die Unterdrückung der nächtlichen Leistungsaufnahme durch den Transfator.

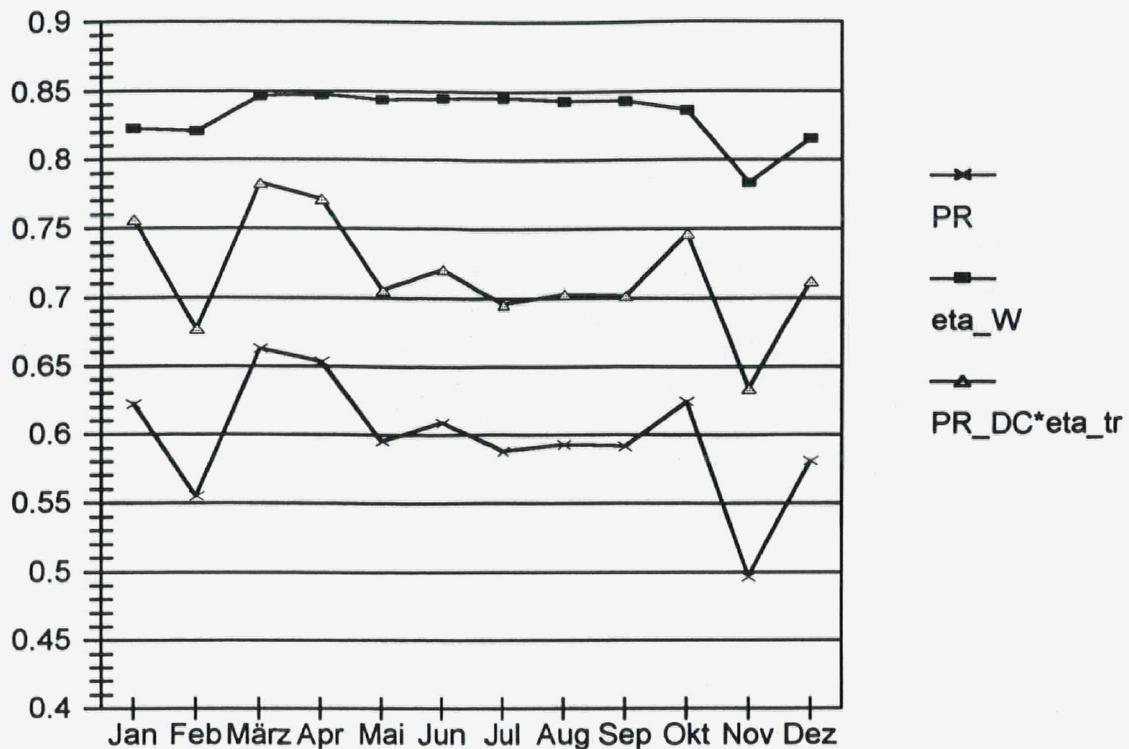


Abb. 5: Monatliche Mittelwerte von Performanz der Anlage, Wirkungsgrad des Wechselrichters und Produkt DC-Performanz des Panels \times Fehlanpassung des Trackers.

3.5.1 Wirkungsgrad des Wechselrichters

Der Wirkungsgradverlauf des Wechselrichters in Abhängigkeit von der Lufttemperatur für vier Einstrahlungswerte ist in Beilage 2 gegeben. Er übersteigt 87% bei einer Einstrahlung von 500 W/m^2 und günstiger Lufttemperatur. Er unterschreitet 85% bei einer Einstrahlung von 250 W/m^2 und einer Lufttemperatur über 16°C. Aus Beilage 2 lässt sich (mit den zusätzlichen, das Endresultat wenig beeinflussenden Annahmen $n_{10\%} = 0.7$ und $n_{5\%} = 0.5$) ein Euro-Wirkungsgrad von 84% bei der Lufttemperatur von 10°C und von 83% bei 20°C ableiten, Werte die sehr gut mit dem gemessenen Jahresmittel von 84% übereinstimmen.

3.5.2 Fehlanpassung des Trackers

Die Einhaltung des MPP-Punktes wurde mit einer Reihe von Messungen bereits im Herbst 1998 überprüft. Es zeigte sich, dass der Wechselrichter trotz Modifikation der Prozessoren im August 1998 (veranlasst durch die Tatsache, dass die optimale Spannung der gelieferten Panels zu tief liegt und nicht jener entspricht, die der Auslegung der Wechselrichter, gemäss Angaben der Firma Solution AG, zugrunde gelegt wurde. s. Jahresbericht) nicht exakt im Optimum arbeitet, sondern eine zu hohe Spannung anpeilt. Dazu kommen Schwingungen um die Gleichgewichtslage. Eine Messung bei hoher Leistung zeigte, dass sich dadurch die Leistung auf 94% reduziert. Bei kleineren Leistungen ist der Verlust vermutlich etwas grösser, jedoch liegen keine Messungen vor.

Eine Rückfrage beim Wechselrichterhersteller Sputnik AG ergab, dass um das Problem zu beheben eine Modifikation des Tracker-Messsystems und entsprechende Softwareänderungen erforderlich sind, dies liege aber angesichts der Kosten (und des unsicheren Marktes) nicht drin.

3.5.3 DC-Performanz des Panels

Nimmt man an, dass im Jahresschnitt die Fehlanpassung des Trackers den Wert von 0.93 nicht unterschreitet, ergibt sich aus Gl. (2) für die mittlere DC-Performanz von Panel 10

$$PR_{DC} = \frac{0.60}{0.84 \cdot 0.93} = 0.77 \quad (3)$$

Für den Monat März folgt analog, mit einer angenommenen Fehlanpassung von 0.94,

$$PR_{DC} = \frac{0.66}{0.845 \cdot 0.94} = 0.83 \quad (4)$$

Diese tiefe DC-Performanz des Panels lässt sich teilweise durch die Fehleinschätzung (Toleranz) der Nennleistung erklären. Die vom Fabrikant angegebene Nennleistung der Anlage ist 2.062 kW, d.h. 206.2 W/Panel. Verschiedene Kennlinienmessungen zeigen aber, dass die effektiv erreichbare Leistung deutlich unter diesem Wert liegt. Die gemessene Strom-Spannungs-Kennlinie bei 950 W/m² und Zellentemperatur 40°C für Panel 10 (bei gereinigtem Panel) zeigt Abb. 6. Die Umrechnung für eine Leistung von 1000 W/m² und 25° Paneltemperatur ergibt eine MPP-Leistung von 185.4 W, die ziemlich genau 90% der Nennleistung entspricht.

Der Verlauf des Panel-Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Lufttemperatur für vier verschiedene Einstrahlungswerte ist in Beilage 3 dargestellt. Der Wirkungsgrad des Solarmoduls (Nr. 10) erreicht bei einer Einstrahlung von 1000 W/m² und 0°C knapp 11%, sinkt aber bei 30°C unter 8%. Zur Bestimmung des Wirkungsgrades wurde die quadratische Panelfläche von 1.298 m x 1.298 m = 1.6848 m² genommen (bezieht man sich auf die eigentliche Solarzellenfläche von 1.492 m², erhöht sich der max. Wirkungsgrad auf 10.8% x 1.13 = 12.2 %).

Berücksichtigt man die Fehleinschätzung der Nennleistung $F_n = 0.9$, folgt aus den Gl. (3) und (4) für den relativen Wirkungsgrad von Panel 10

$$\text{Jahresmittel } \eta_r = \frac{0.77}{0.9} = 0.86 \quad \text{Monat März } \eta_r = \frac{0.83}{0.9} = 0.92 \quad (5)$$

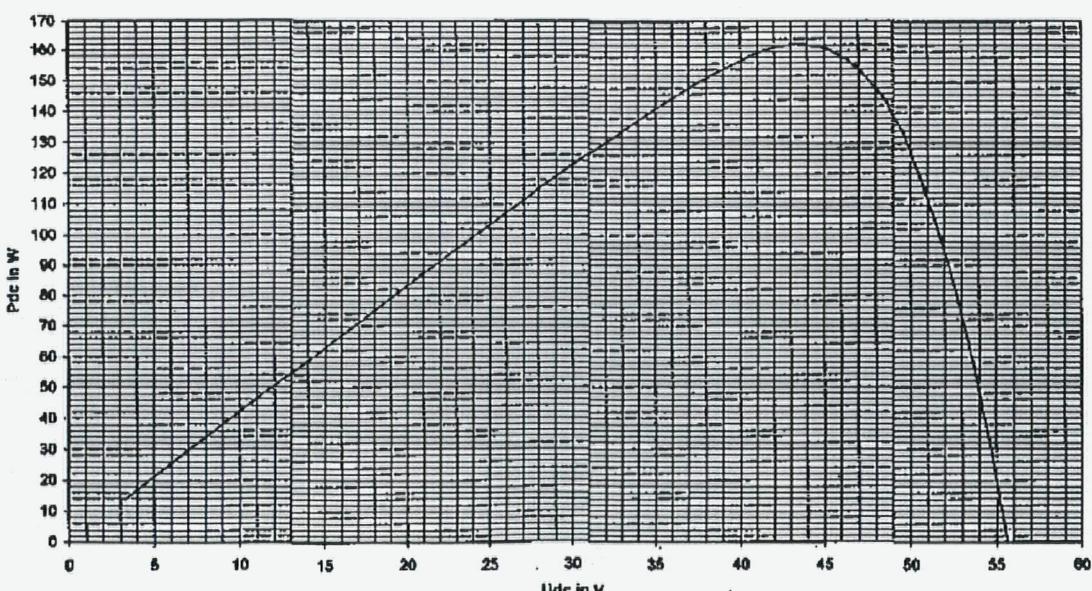


Abb. 6: Kennlinie des Solargenerators Nr. 10 am 19.9.1998 um 14.22 (MESZ) mit 950 W/m² und 40°C Solarzellentemperatur (gereinigter Zustand)

Gemäss Tabelle 1 ist die mittlere Lufttemperatur des Jahres 10.1°C, jene des Monats März 5.9°C.

Der relative Wirkungsgrad des Panels ist eine Funktion der Einstrahlung und der Zellentemperatur. Mit guten Solarzellen lassen sich mittlere Euro-Wirkungsgrade über 97% bei 25°C Solarzellentemperatur und über 91% bei 40°C erreichen (s Lit. [1] und [2]). Die Wirkungsgrade in Gl. (5) liegen eindeutig (schätzungsweise etwa 4 Prozentpunkte) zu tief, was auf eine unbefriedigende Qualität der Solution-Solarzellen hinweist.

Um die Aussage von Gl.(5) zu verifizieren, wurde das Verhalten von Panel 10 mit einem Solarpanel-Simulationsprogramm überprüft. Grundlage für die Bestimmung der Kennlinien-Parameter war die gemessene Kennlinie in Abb. 6. Da keine Daten gerettet werden konnten, die weitere zuverlässige Aussagen für Einstrahlungen < 950 W/m² erlauben, wurden nachträglich Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom sowie einige Strom-Spannungskennlinien für verschiedene Einstrahlungen von 1% bis 85% direkt am Panel 10 gemessen, um so zusätzliche Informationen über das Solarzellenverhalten und insbesondere die Leerlaufspannung zu erhalten. Die simulierten Kennlinien sind in Beilage 4 dargestellt. Die theoretischen Grundlagen dazu sind in Lit. [2] erläutert.

Die Simulation von Panel 10 liefert einen relativen Euro-Wirkungsgrad von 91.5% bei 25°C und von 84.5% bei 40°C. Nimmt man an Stelle der Euro-Gewichtung jene, die der effektiven Einstrahlungsdauer entspricht, gemäss Beilage 5, erhält man leicht bessere, aber vom Euro-Wert nur wenig abweichende mittlere Wirkungsgrade, nämlich 92.5% bei 25°C und 85% bei 40°C, was zufriedenstellend mit den Resultaten in (Gl. 5) übereinstimmt. Tabelle 4 zeigt die Euro-Gewichtung und die sich aus Beilage 5 ergebende effektive Gewichtung für das Jahr 1999.

Tabelle 4 : Gewichtung zur Bestimmung des mittleren Wirkungsgrades

Einstrahl.	5%	10%	20%	30%	50%	75%	100%
Euro	0.03	0.06	0.13	0.10	0.48	0	0.2
Effektiv 1999	0.0425	0.0595	0.084	0.11	0.235	0.299	0.170

3.5 4 Mögliche Performanzverbesserungen

Mit weitgehender Elimination der Fehlanpassung des Trackers (Einhaltung des MPP's) auf mindestens 0.98 und falls die Nennleistung des Panels gleich zur effektiv erbrachten Leistung im MPP-Punkt bei 1000 W/m² und 25°C angenommen wird, ergäbe sich mit demselben Panel und dem gemessenen Wechselrichterwirkungsgrad eine mittlere Jahresperformanz von

$$PR = 0.84 \cdot 0.98 \cdot 0.86 = 0.71 \quad (6)$$

Mit besseren Solarzellen sollte eine mittlere Performanz von

$$PR = 0.84 \cdot 0.98 \cdot 0.91 = 0.75 \quad (7)$$

erreicherbar sein. Eine Erhöhung des mittleren Wechselrichterwirkungsgrades auf über 84% ist durch einen zusätzlichen Aufwand zur Optimierung der Leistungselektronik und der Konstruktion technisch machbar. Für kleine Wechselrichter von 200 W Leistung mit Transformatoren stellt sich allerdings die Frage, ob dies auch wirtschaftlich sinnvoll ist, und müsste im konkreten Fall durch eine entsprechende Optimierungsrechnung begründet werden.

3.6 Weitere Graphiken

3.6.1 Häufigkeit von Einstrahlung und Temperaturen

Für das Kalenderjahr 1999 sind in Beilage 5 die Häufigkeit der Einstrahlung und in Beilage 6 die Häufigkeiten der Panel- und Lufttemperatur dargestellt.

3.6.2 Typischer Tagesgang bei voller Einstrahlung

Der Tagesgang der Einstrahlung in der Panelebene und der Leistung der Anlage und aller Wechselrichter sowie des Wechselrichterklimas der WR 9 und 10 ist in folgenden Beilagen dargestellt:

Wintertag	12.02.99: mittlere Lufttemperatur = - 8.1°C, Einstrahlung = 5.678 kWh/m ² /d Beilage 7: Einstrahlung, Wechselrichterklima Beilage 8: Anlageleistung, Einzelwechselrichterleistungen.
Frühlingstag	10.04.99: mittlere Lufttemperatur = 10.4°C, Einstrahlung = 6.703 kWh/m ² /d. (Die mittlere Lufttemperatur entspricht etwa dem Durchschnitt 1999). Beilage 9: Einstrahlung, Wechselrichterklima Beilage 10: Anlageleistung, Einzelwechselrichterleistungen.
Sommertag	25.07.99: mittlere Lufttemperatur = 18.9°C, Einstrahlung = 7.251 kWh/m ² /d (Höchstwert von 1999) Beilage 11: Einstrahlung, Wechselrichterklima Beilage 12: Anlageleistung, Einzelwechselrichterleistungen

4. Schlussfolgerungen und Aussichten

Die Anlage und insbesondere die Wechselrichter zeigten eine ausgezeichnete Zuverlässigkeit und arbeiteten störungsfrei während der ganzen mehr als einjährigen Testzeit. Die Innen-temperatur des Wechselrichters und die Gehäusetemperatur des Elektrolytkondensators blieben innerhalb zulässiger und für die langfristige Zuverlässigkeit der Anlage annehmbarer Grenzen.

Die Jahresperformance beträgt 61% für Panels ohne Beschattung. Mit Panels, deren MPP-Leistung bei Nennbedingungen der Nennleistung entspricht, steigt die Jahresperformance auf 68%. Durch Hardware- (Messschaltung) und Softwareverbesserungen des Tracking, die zu einer besseren Einhaltung des MPP führen werden, kann weiter die Jahresperformance auf mindestens 71% gesteigert werden. Eine weitere Erhöhung lässt sich schliesslich durch Panels besserer Qualität, d.h. mit besserem relativen Wirkungsgrad, erreichen, die eine Steigerung auf 75% erlauben sollten, für Mittellandverhältnisse und insbesondere für Biel bei 45° Panelneigung ein akzeptabler Wert. Mehr kann nur durch Verbesserung des Wechselrichterwirkungsgrades, dessen mittlerer Wert jetzt bei 84% liegt, erzielt werden. Dies ist durch Optimierung des leistungselektronisches Konzeptes und Verbesserung der Konstruktion möglich. Fazit: Das Wechselrichterkonzept hat sich bewährt. Es ist durchaus sinnvoll, bei zufriedenstellender Marktnachfrage einen Weiterentwicklungsaufwand zu erbringen.

Literatur:

- [1] Wagner Andreas: Photovoltaik Engineering. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1999)
- [2] Crastan Valentin: Elektrische Energieversorgung 2. Springer-Verlag , Berlin, Heidelberg, New York (2001)

Beilage 1

Performanz-Auswertung der Stundenwerte für das Jahr 1999 von Wechselrichter 10

Monat	Etot [kWh/m ²]	E [kWh/m ²]	E/Etot	Wtot ₁₀ [kWh]	Wneg ₁₀ [kWh]	Weff ₁₀ [kWh]	PRtot ₁₀ [%]	PReff ₁₀ [%]	Schlechtwettertage
Januar	47.4	44.9	0.948	5.365	0.716	6.081	54.9	62.3	8
Februar	54.0	52.9	0.979	5.586	0.603	6.189	50.1	55.6	9
März	97.2	95.4	0.981	12.716	0.574	13.291	63.4	66.3	2
April	109.4	107.5	0.982	14.266	0.488	14.754	63.2	65.4	1
Mai	133.1	130.5	0.980	15.876	0.470	16.346	57.8	59.6	0
Juni	142.3	141.1	0.992	17.448	0.426	17.874	59.5	60.9	0
Juli	158.5	156.3	0.986	18.774	0.437	19.211	57.5	58.8	0
August	137.5	135.4	0.985	16.335	0.470	16.805	57.6	59.3	1
September	117.6	115.9	0.986	13.838	0.507	14.345	57.1	59.2	1
Oktober	69.1	67.7	0.979	8.256	0.645	8.901	57.9	62.5	6
November	29.2	28.7	0.983	2.236	0.753	2.990	37.2	49.7	18
Dezember	34.5	33.8	0.980	3.337	0.795	4.132	46.9	58.1	14
Jahrestotal	1129.8	1110.1	0.983	134.032	6.886	140.918	57.5	60.5	

Hinweise: Etot=Einstrahlungsenergie unter Berücksichtigung aller Stundenwerte
 E=Einstrahlungsenergie unter Berücksichtigung jener Werte, welche über 50W/m² lagen
 E/Etot=Verhältnis der beiden Einstrahlungsenergien
 Wtot₁₀=Wechselstromenergie vom Wechselrichter 10, mit Berücksichtigung des Leistungsbezuges
 Wneg₁₀=Netzbezug vom Wechselrichter 10 (Summe aller negativen Werte)
 Weff₁₀=Wechselstromenergie vom Wechselrichter 10 ohne Berücksichtigung des Netzbezuges
 PRtot₁₀=Wtot₁₀/Etot/0.2062*100
 PReff₁₀=Weff₁₀/Etot/0.2062*100
 Diese Werte sind nicht direkt vergleichbar mit jenen Angaben in Tabelle 2, wo die kleinen Leistungen unterdrückt wurden!

Schlechtwettertage=Anzahl der Tage mit Nebel, Hochnebel, starkem Regen oder Schneefall

19.10.00

Beilage 2

Wirkungsgrad von Wechselrichter Nr. 10 (gespeist vom Solarmodul Nr.10)

Die vier Einstrahlungsklassen haben folgende Toleranzbreiten:

25% der Nenneinstrahlung = 250 W/m² +/- 10%

50% der Nenneinstrahlung = 500 W/m² +/-10%

75% der Nenneinstrahlung = 750 W/m² +/-10%

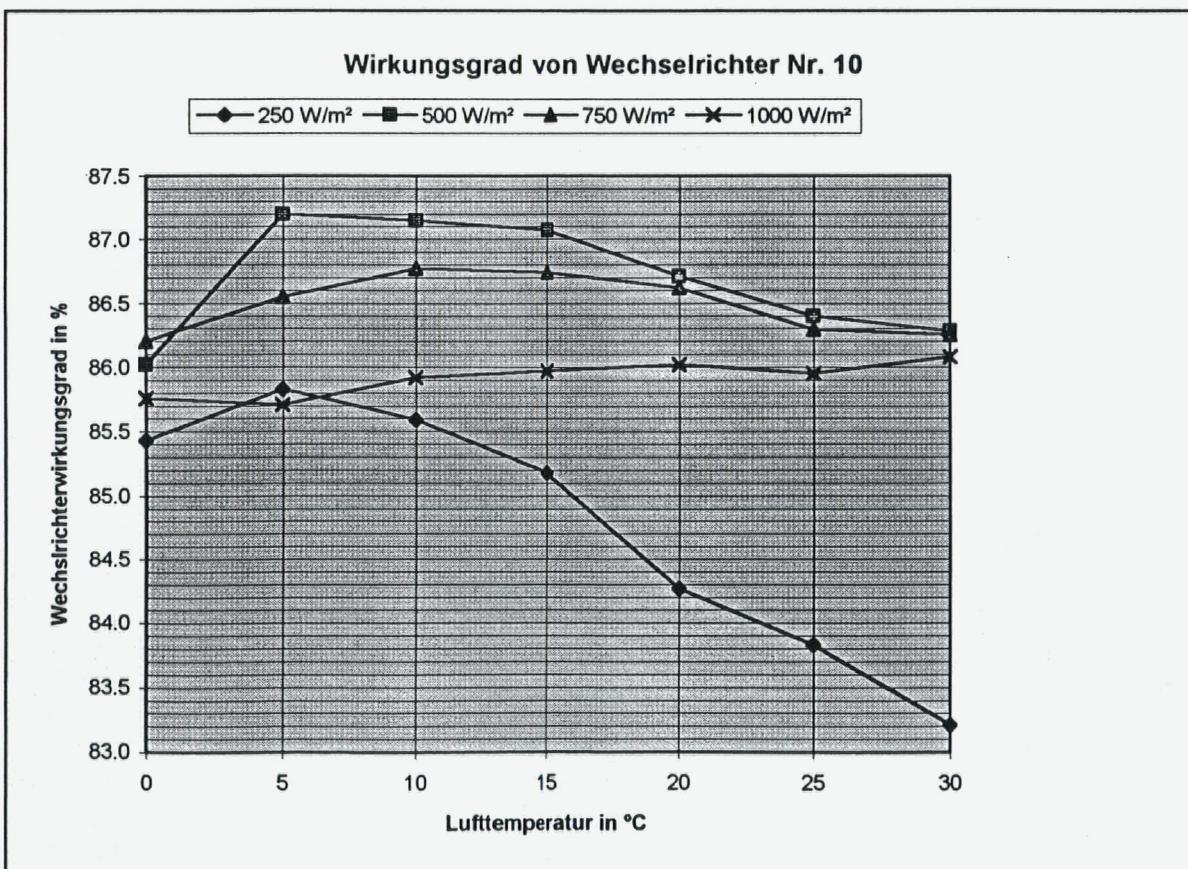
100% der Nenneinstrahlung = 1000 W/m² +/-10%

Für die sieben Lufttemperaturklassen beträgt der Toleranzbereich stets +/- 2,5°C.

$$\text{Wechselrichterwirkungsgrad} = \text{Pac [W]}/\text{Pdc [W]}$$

In der folgenden Tabelle ist der Wirkungsgrad in Prozenten angegeben:

Lufttemp. Tlav [°C]	Einstrahlung 250 W/m ²	Einstrahlung 500 W/m ²	Einstrahlung 750 W/m ²	Einstrahlung 1000 W/m ²
0	85.43	86.02	86.20	85.76
5	85.83	87.20	86.55	85.71
10	85.59	87.15	86.77	85.92
15	85.18	87.07	86.74	85.97
20	84.27	86.71	86.62	86.02
25	83.83	86.40	86.29	85.95
30	83.21	86.28	86.25	86.08



Es fällt auf, dass der Wirkungsgrad des Wechselrichters Nr. 10 bei grösserer Einstrahlung nur wenig von der Lufttemperatur abhängt. Erst bei kleinen Einstrahlungswerten sinkt der Wechselrichterwirkungsgrad bei höheren Lufttemperaturen.

Beilage 3

Wirkungsgrad von Solarmodul Nr. 10 (belastet mit Wechselrichter Nr. 10)

Die vier Einstrahlungsklassen haben folgende Toleranzbreiten:

25% der Nenneinstrahlung = 250 W/m² +/- 10%

50% der Nenneinstrahlung = 500 W/m² +/-10%

75% der Nenneinstrahlung = 750 W/m² +/-10%

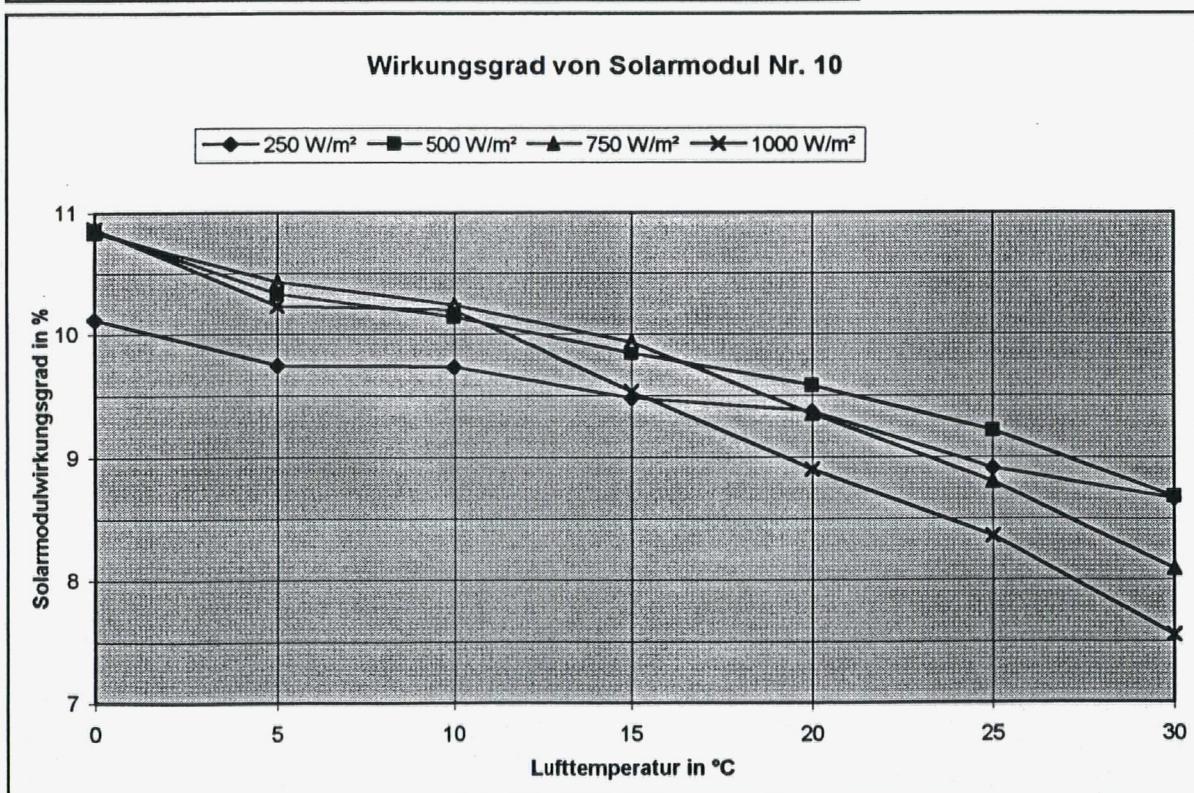
100% der Nenneinstrahlung = 1000 W/m² +/-10%

Für die sieben Lufttemperaturklassen beträgt der Toleranzbereich stets +/- 2,5°C.

$$\text{Solarmodulwirkungsgrad} = P_{dc} [\text{W}] / (1,6848 [\text{m}^2] \times E [\text{W/m}^2])$$

In der folgenden Tabelle ist der Wirkungsgrad des Solarmoduls in Prozenten angegeben:

Lufttemp. Tlav [°C]	Einstrahlung 250 W/m ²	Einstrahlung 500 W/m ²	Einstrahlung 750 W/m ²	Einstrahlung 1000 W/m ²
0	10.12	10.86	10.84	10.87
5	9.74	10.33	10.43	10.23
10	9.73	10.14	10.24	10.20
15	9.48	9.84	9.93	9.53
20	9.37	9.58	9.35	8.90
25	8.91	9.21	8.80	8.36
30	8.66	8.68	8.09	7.55

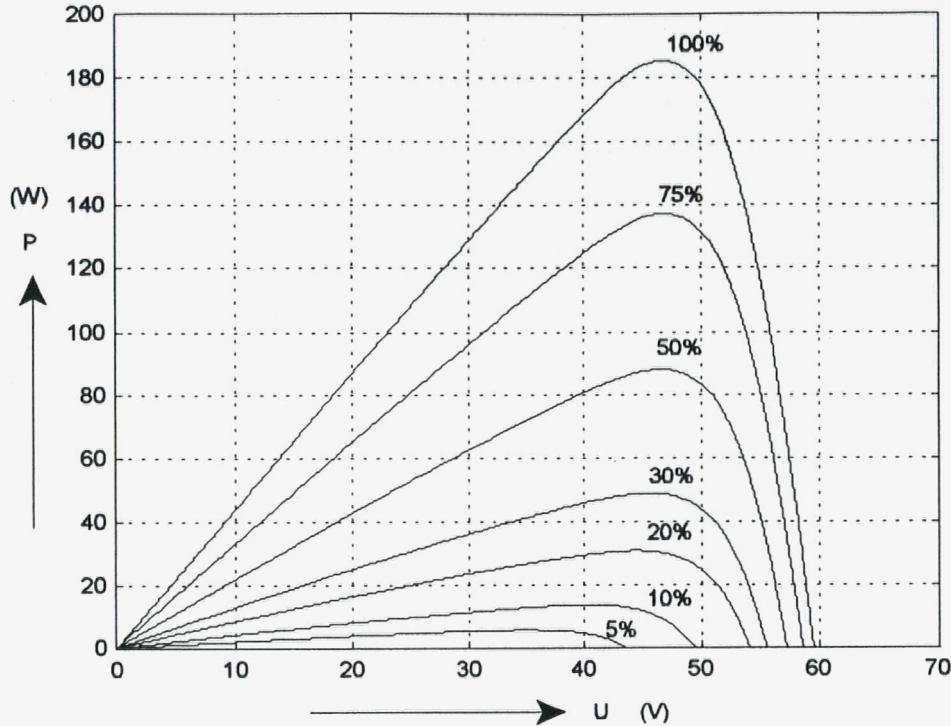


Bei kleiner Einstrahlung beobachtet man das typische Verhalten einer Solarzelle, welche ihre Leistungsabgabe um ca. 0,4%/°C Temperaturerhöhung reduziert. Die Kurven mit höheren Einstrahlungen zeigen einen deutlich stärkeren Temperatureinfluss, wobei nicht abgeklärt werden konnte, ob diese Verschlechterung durch den nicht optimalen Betriebspunkt des Wechselrichters verursacht wird.

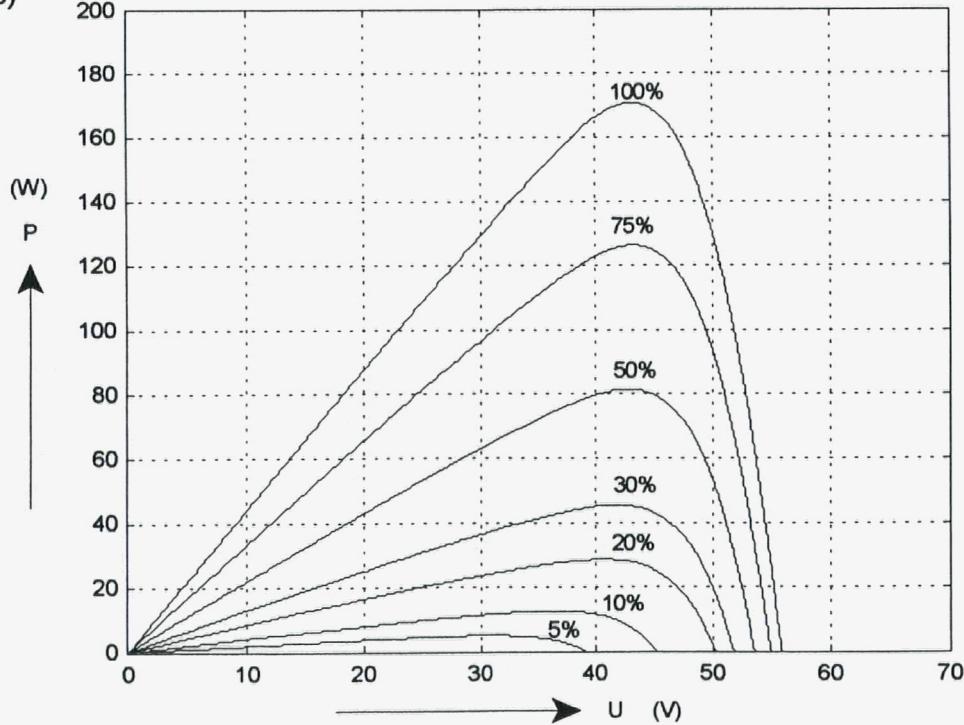
Beilage 4

Simulation der Panelkennlinien (Leistung) für verschiedene Einstrahlungen (Matlab, Methode in Lit. [2])
a) Zellentemperatur 25°C b) Zellentemperatur 40°C

a)



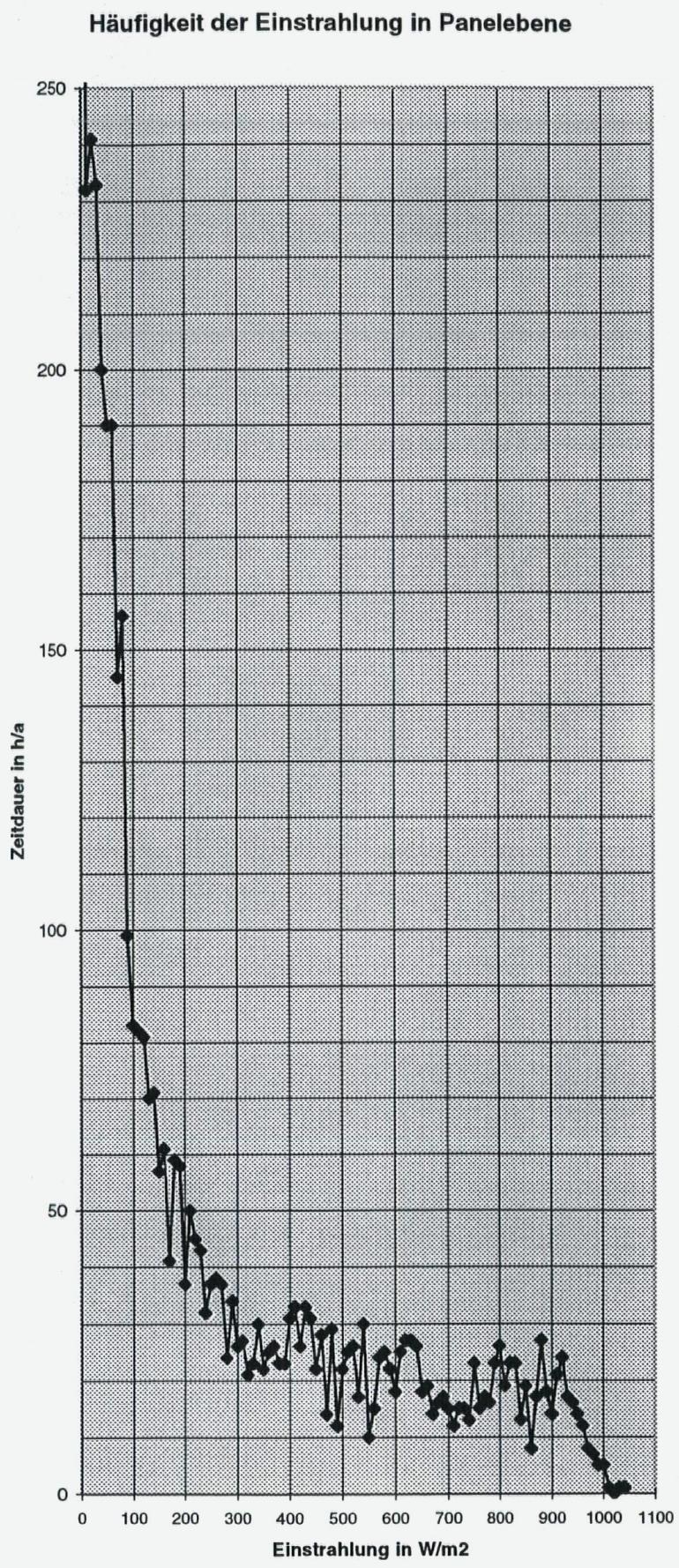
b)



Beilage 5

Häufigkeit der Einstrahlung in Panelebene im Kalenderjahr 1999

Ein-strahlung [W/m ²]	Zeit-dauer [h/a]	Ein-strahlung [W/m ²]	Zeit-dauer [h/a]
0	4603	530	17
10	232	540	30
20	241	550	10
30	233	560	15
40	200	570	24
50	190	580	25
60	190	590	22
70	145	600	18
80	156	610	25
90	99	620	27
100	83	630	27
110	82	640	26
120	81	650	18
130	70	660	19
140	71	670	14
150	57	680	16
160	61	690	17
170	41	700	15
180	59	710	12
190	58	720	15
200	37	730	15
210	50	740	13
220	45	750	23
230	43	760	15
240	32	770	17
250	37	780	16
260	38	790	23
270	37	800	26
280	24	810	19
290	34	820	23
300	26	830	23
310	27	840	13
320	21	850	19
330	23	860	8
340	30	870	17
350	22	880	27
360	25	890	18
370	26	900	14
380	23	910	21
390	23	920	24
400	31	930	17
410	33	940	16
420	26	950	14
430	33	960	12
440	31	970	8
450	22	980	7
460	28	990	5
470	14	1000	5
480	29	1010	1
490	12	1020	0
500	22	1030	1
510	25	1040	1
520	26		

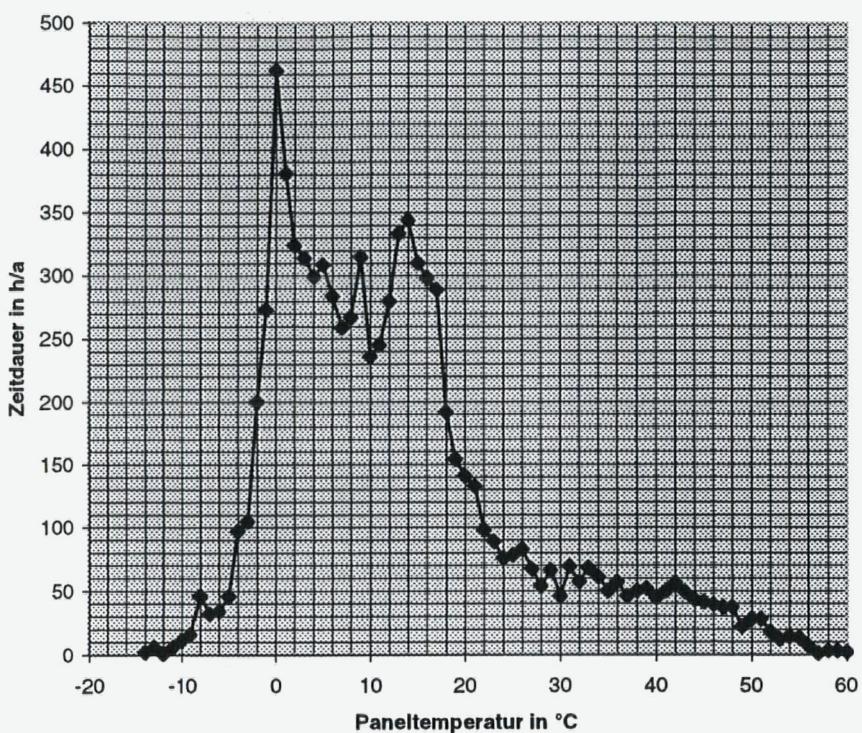


Beilage 6

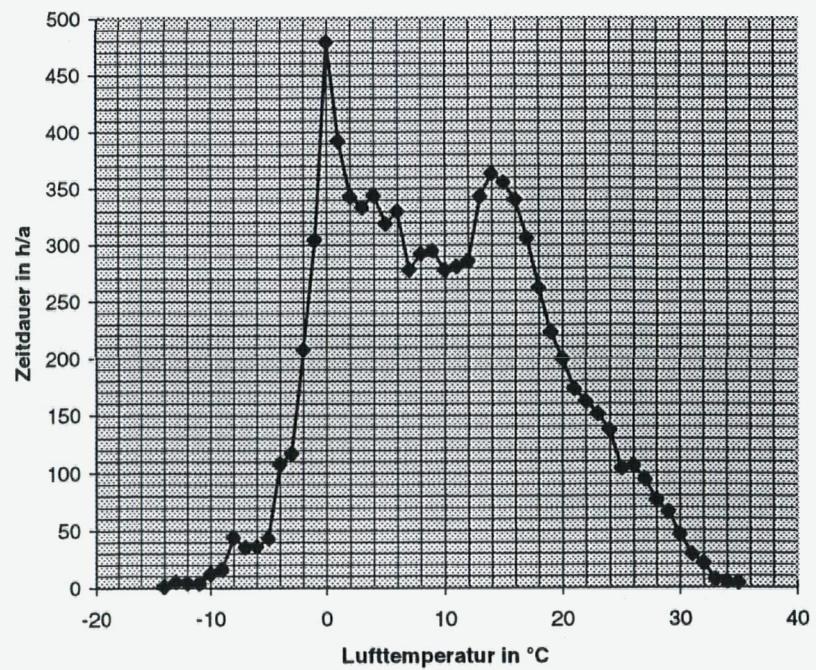
Häufigkeit der Panel- und Lufttemperatur im Kalenderjahr 1999

Temp. gerundet [°C]	Zeitdauer Panel [h/a]	Zeitdauer Luft [h/a]
-14	2	1
-13	6	5
-12	1	4
-11	6	4
-10	11	12
-9	16	16
-8	46	44
-7	32	35
-6	34	36
-5	46	43
-4	97	108
-3	105	117
-2	200	208
-1	273	305
0	463	479
1	381	392
2	324	343
3	314	333
4	299	344
5	309	319
6	284	330
7	259	278
8	267	292
9	315	295
10	236	278
11	245	281
12	280	286
13	333	343
14	344	363
15	310	355
16	298	340
17	289	306
18	192	262
19	154	223
20	141	199
21	133	173
22	98	162
23	89	151
24	76	137
25	78	104
26	83	106
27	67	94
28	54	76
29	66	66
30	46	46
31	69	29
32	57	21
33	68	7
34	61	5
35	50	4
36	57	
37	46	
38	50	
39	52	
40	45	
41	50	
42	56	
43	49	
44	43	
45	41	
46	39	
47	37	
48	37	
49	22	
50	28	
51	28	
52	18	
53	12	
54	14	
55	13	
56	7	
57	1	
58	3	
59	3	
60	2	

Häufigkeit der Paneltemperatur

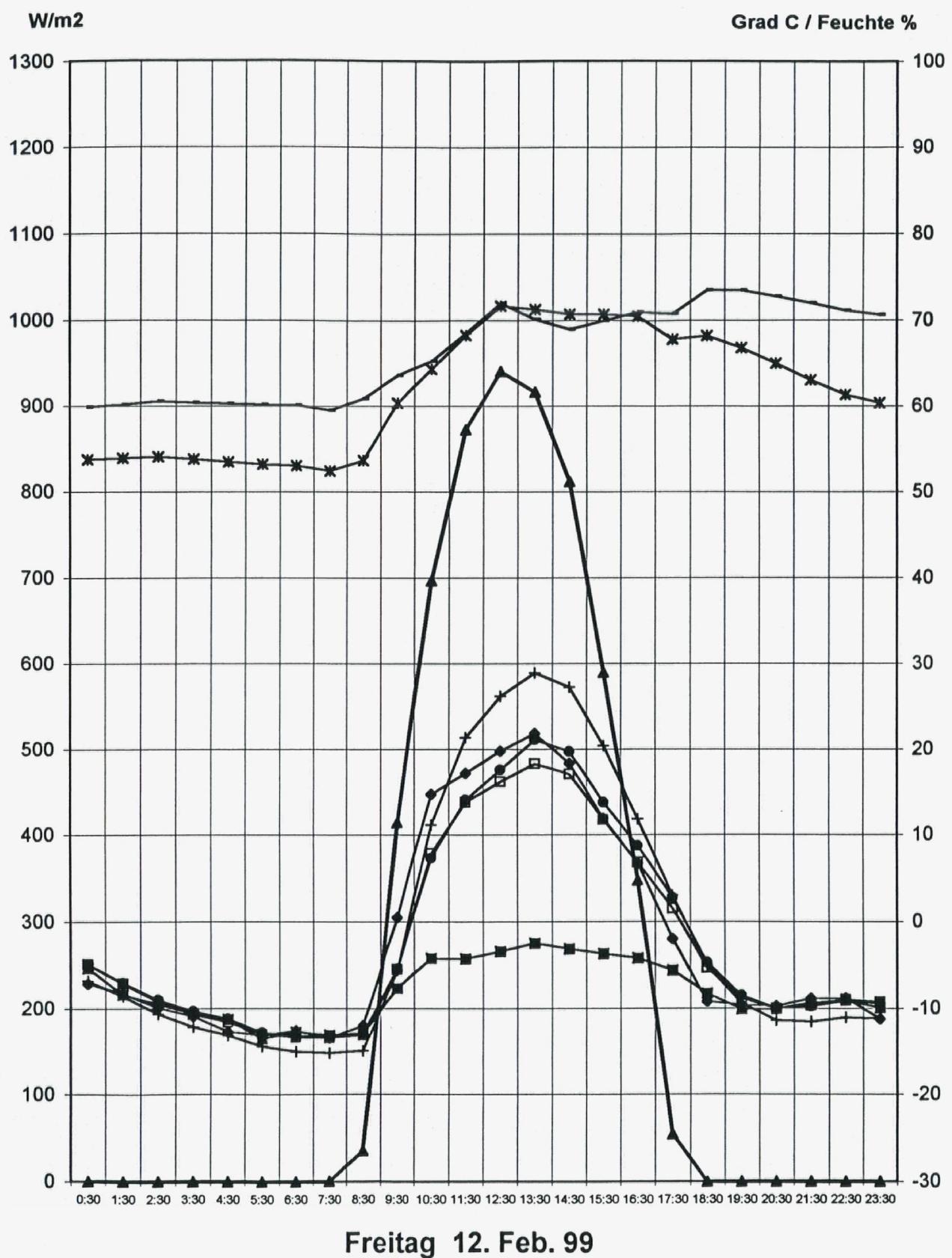


Häufigkeit der Lufttemperatur



Beilage 7

Tagesgang Einstrahlung / Wechselrichterklima

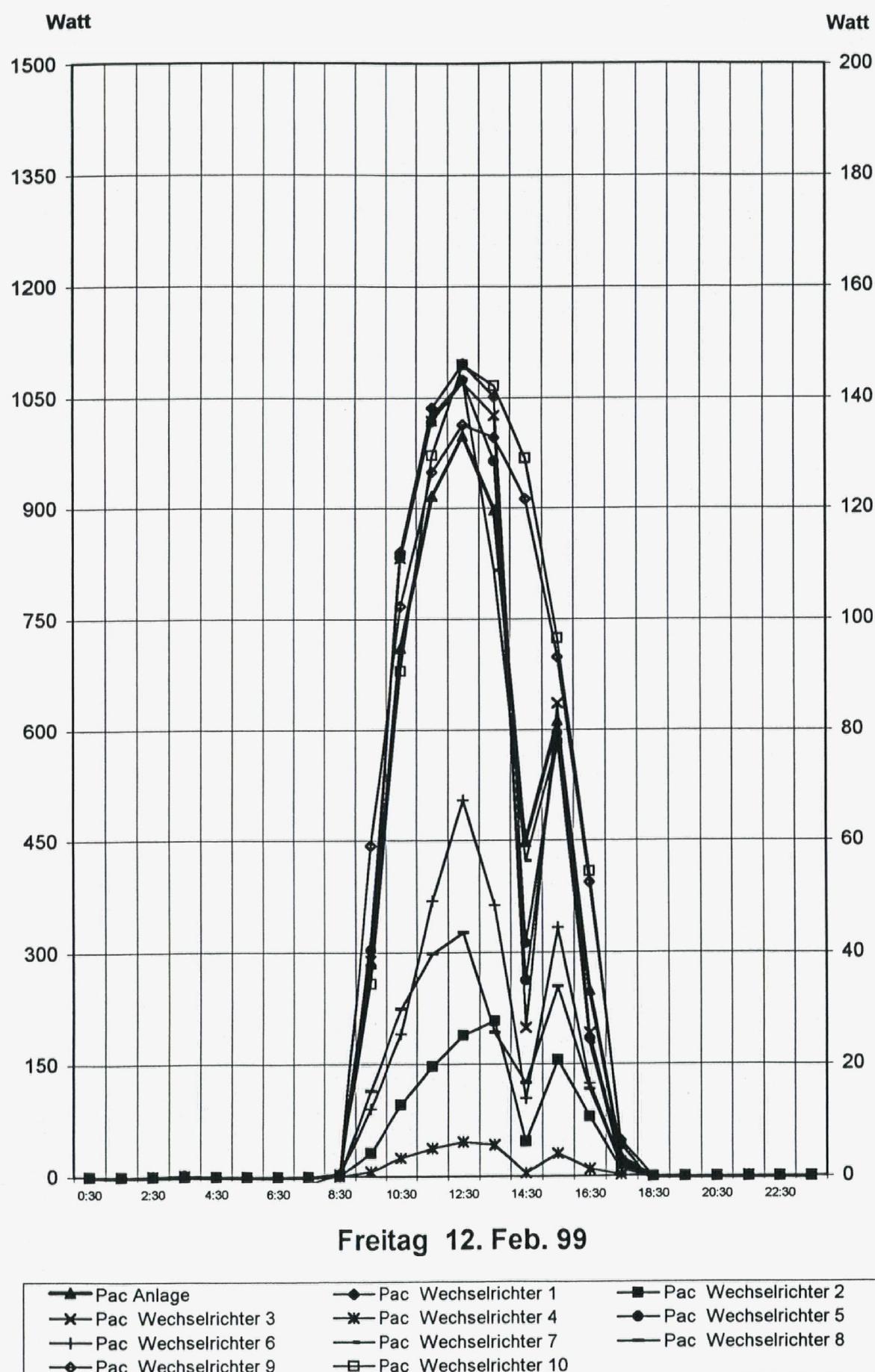


Freitag 12. Feb. 99

- Einstrahlung Paneelebene
 - mittlere Lufttemperatur
 - * mittlere Feuchte Wechselrichter 9
 - mittlere Feuchte Wechselrichter 10
 - mittlere Paneltemperatur
 - mittlere Temperatur Wechselrichter 9
 - mittlere Temperatur Wechselrichter 10
 - Temperatur Elektrolyt-Kondensator

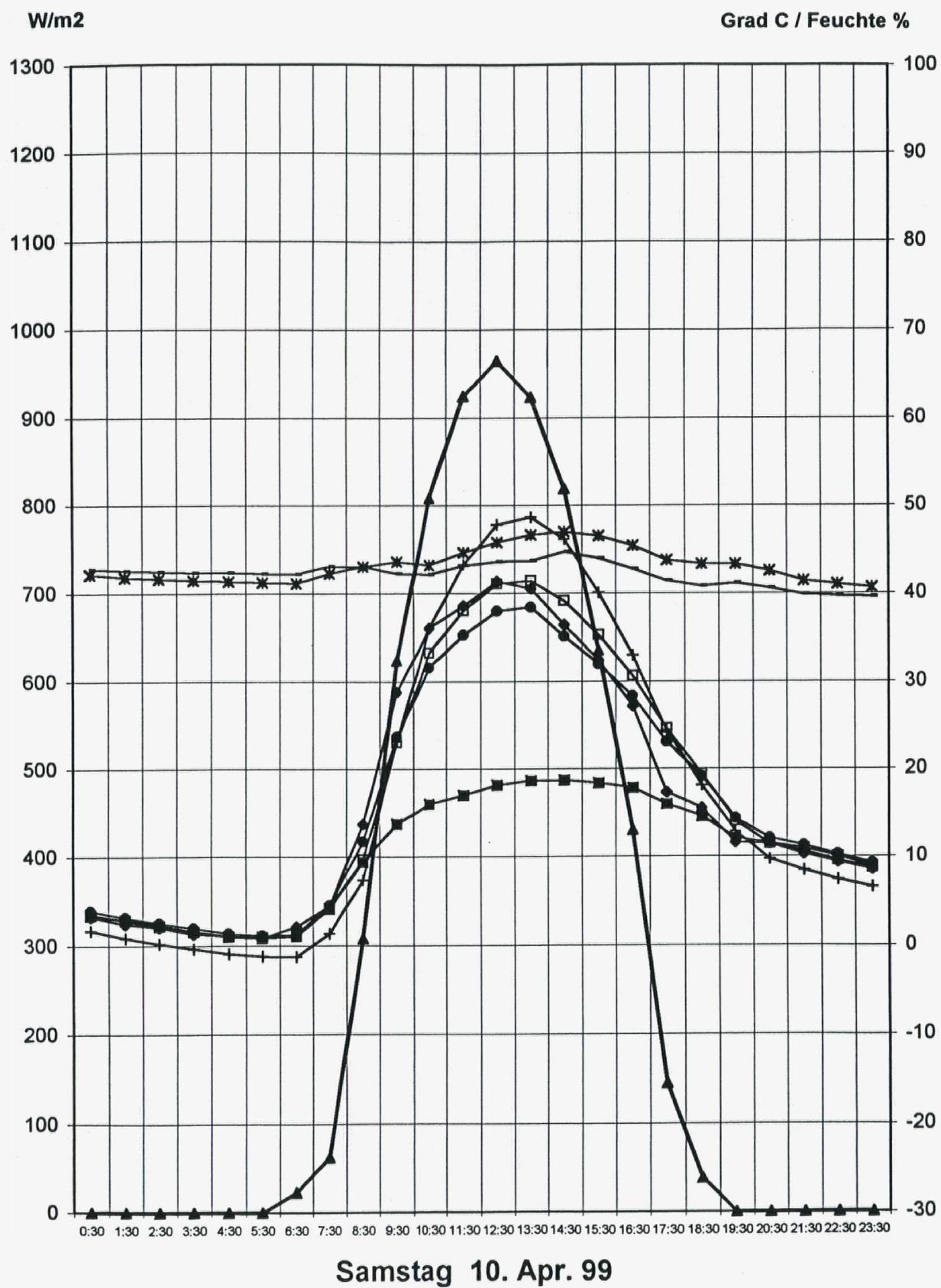
Beilage 8

Tagesgang Anlageleistung / Einzelwechselrichterleistungen



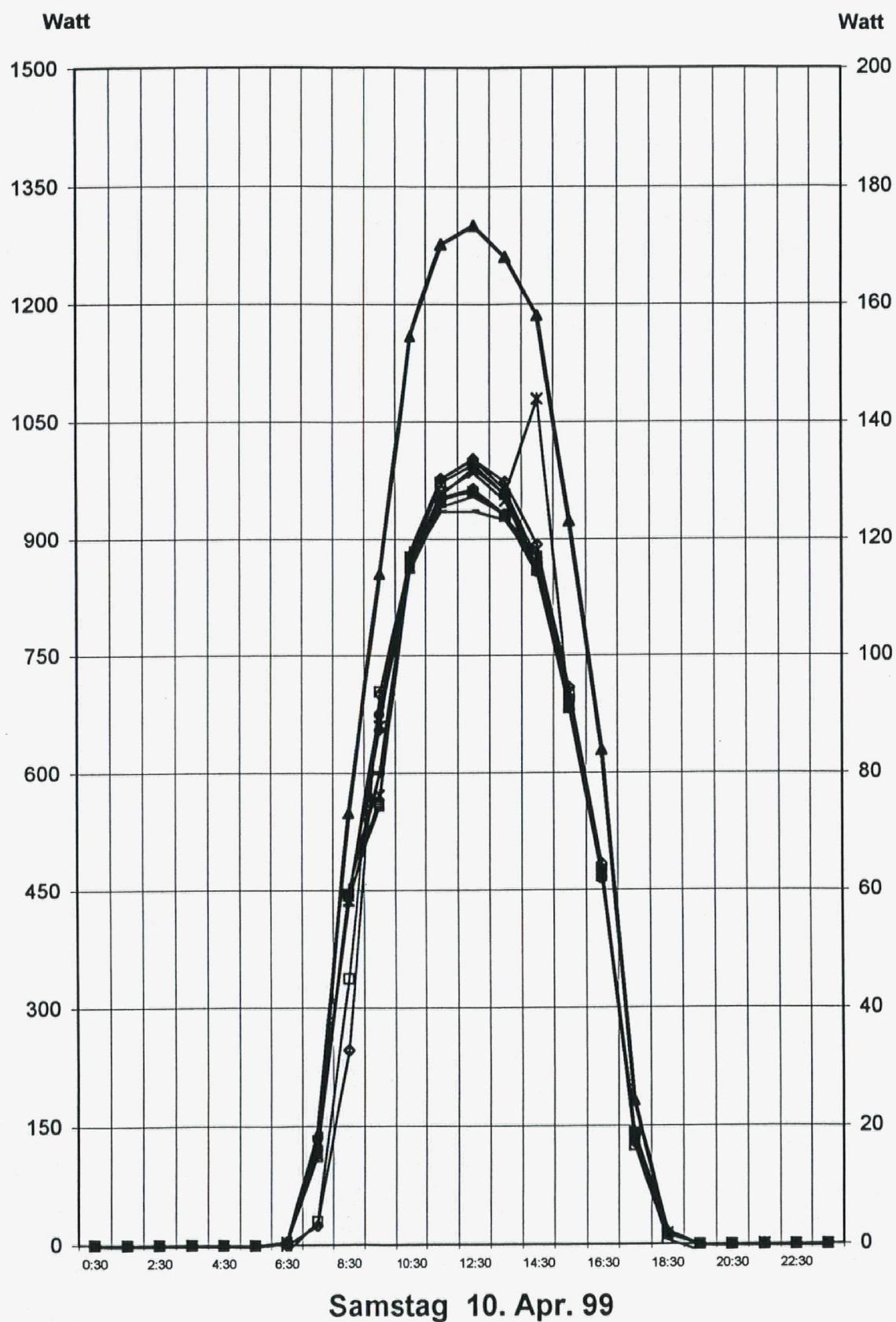
Beilage 9

Tagesgang Einstrahlung / Wechselrichterklima



Beilage 10

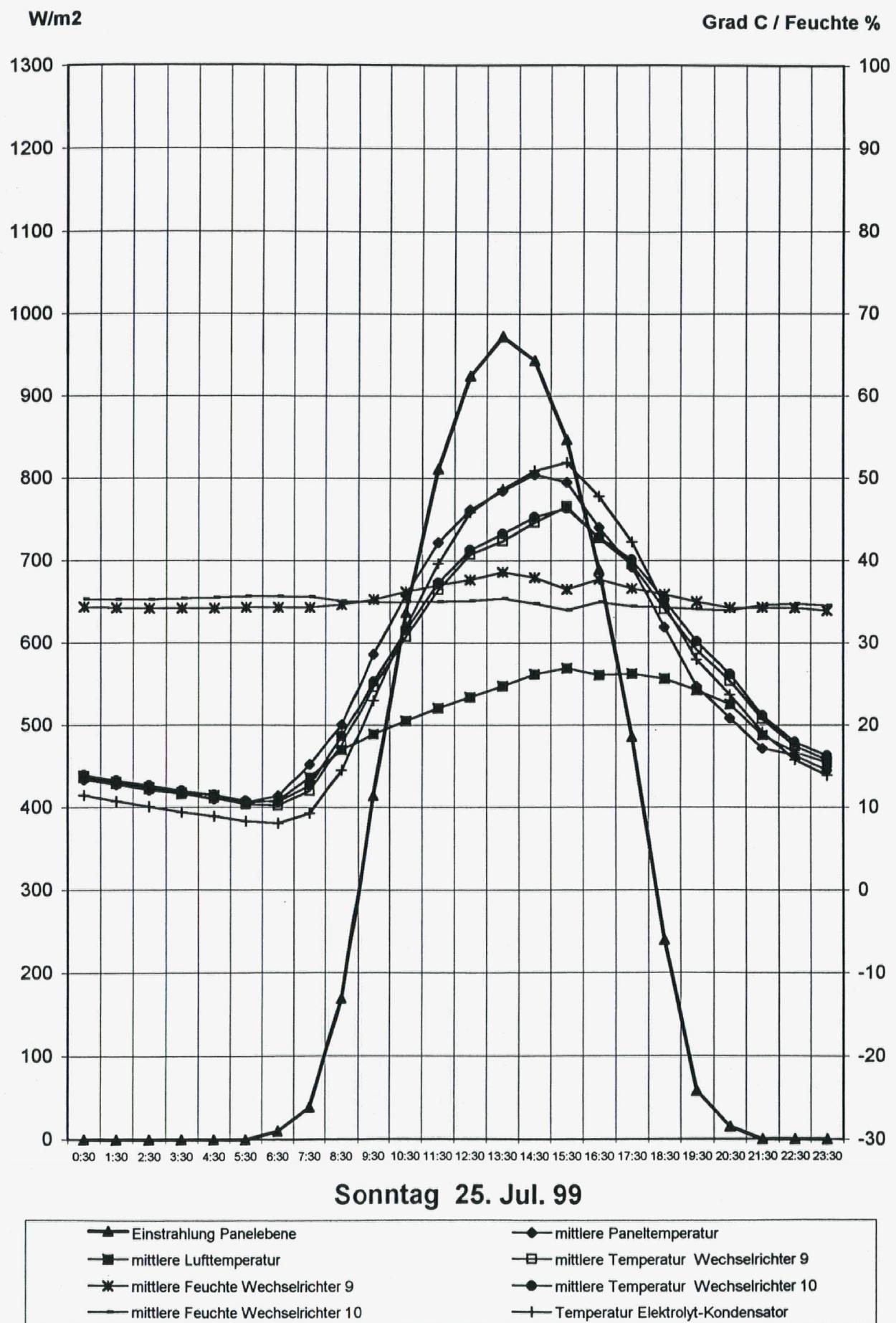
Tagesgang Anlageleistung / Einzelwechselrichterleistungen



Pac Anlage	Pac Wechselrichter 1	Pac Wechselrichter 2
■ Pac Wechselrichter 3	◆ Pac Wechselrichter 4	■ Pac Wechselrichter 5
— Pac Wechselrichter 6	— Pac Wechselrichter 7	— Pac Wechselrichter 8
● Pac Wechselrichter 9	□ Pac Wechselrichter 10	

Beilage 11

Tagesgang Einstrahlung / Wechselrichterklima



Beilage 12

Tagesgang Anlageleistung / Einzelwechselrichterleistungen



Sonntag 25. Jul. 99

Pac Anlage	Pac Wechselrichter 1	Pac Wechselrichter 2
—▲— Pac Wechselrichter 3	—◆— Pac Wechselrichter 4	—■— Pac Wechselrichter 5
—+— Pac Wechselrichter 6	—×— Pac Wechselrichter 7	——— Pac Wechselrichter 8
—◊— Pac Wechselrichter 9	—□— Pac Wechselrichter 10	