

ZAE BAYERN

**AUFBAU EINER PHOTOVOLTAIKANLAGE AN DER
UNIVERSITÄT DEBRECEN/UNGARN ALS
LEHR- UND DEMONSTRATIONSANLAGE**

*Abschlussbericht
an die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt*

Förderkennzeichen 19011

Januar 2005



**BAYERISCHES ZENTRUM FÜR
ANGEWANDTE ENERGIEFORSCHUNG E.V.**

**BAVARIAN CENTER FOR
APPLIED ENERGY RESEARCH**

AUFBAU EINER PHOTOVOLTAIKANLAGE AN DER UNIVERSITÄT DEBRECEN/UNGARN ALS LEHR- UND DEMONSTRATIONSANLAGE

Abschlussbericht

**Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Förderkennzeichen 19011**

Durchführung

**Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung
Abt. Solarthermie und Biomasse**

Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. D. Hein
Abteilungsleiter: Dipl.-Phys. W. Schölkopf

Bearbeitung:

M. Reuß (Projektleiter), W. Schölkopf

Walther-Meißner-Str 6, 85478 Garching
Tel. 089 / 356250-0, Fax 089 / 356250-23
<http://www.zae-bayern.de/>

**Universität Debrecen
Zentrum für Agrarwissenschaften
Landwirtschaftliche Fakultät , Abt. Agrartechnik**

Bearbeitung:

Univ.-Dozent Dr. G. Grasselli (Projektleiter), Z. Szecsko

Debrecen, 4032, Böszörményi út 138,
Tel.: +36 52 508-323, Fax: +36 52 508-315
Email: grasselli@helios.date.hu

Januar 2005

INHALTSVERZEICHNIS

1.	ZIELSTELLUNG DES PROJEKTS	2
2.	RAHMENBEDINGUNGEN DES DEMONSTRATIONSPROJEKTS	2
2.1	Durchführende Institution Universität Debrecen	2
2.2	Organisation und Projektabwicklung	3
2.3	Beschreibung des Standortes Debrecen	4
3.	DEMONSTRATIONSANLAGE	5
3.4	Technisches Konzept der Anlage	5
3.5	Montagegestelle der Solargeneratoren	8
3.6	Solargeneratoren	9
3.6.1	Polykristalline Solarmodule	9
3.6.2	CIS - Solarmodule	10
3.6.3	a-Si - Solarmodule	12
3.7	Wechselrichter	13
3.8	Messtechnik	15
3.8.1	Messwerterfassung der Photovoltaik-Anlage	15
3.8.2	Messwerterfassung der Meteorologiestation	17
4.	PHOTOVOLTAIK IN DER AUSBILDUNG	19
4.1	Beschreibung des Praktikumsplatz	20
4.2	Ökologische und ökonomische Aspekte	21
5.	AUFBAU UND BETRIEB DER ANLAGE	22
5.1	Aufbau der Anlage	22
5.2	Messergebnisse	22
6.	ZUSAMMENFASSUNG	31
7.	ANHANG	32
7.1	Literaturverzeichnis	32
7.2	Abbildungsverzeichnis	32
7.3	Tabellenverzeichnis	34

1. Zielstellung des Projekts

Mit der politischen Wende 1989 in Ungarn und dem damit verbundenen wirtschaftlichen Umbau gewannen Umweltschutz und umweltschonenden Techniken zur Energieversorgung an Bedeutung. Dies widerspiegelt sich in den Medien und im deutlich wachsenden Interesse der Bevölkerung.

Die Bedingungen zur direkten Nutzung solarer Energie sind für solarthermische und photovoltaische Anlagen besonders günstig, da die Globalstrahlung ca. 20 % höher liegt als in Süddeutschland. Bislang ist die Nutzung erneuerbarer Energien in Ungarn allerdings eher bescheiden und erfolgt nur in den Bereichen Solarthermie, Biogas, Geothermie und Wasserkraft. Die Photovoltaik beschränkte sich zu Beginn des Vorhabens auf Kleinanlagen bis maximal 2 kW_p. Die im Rahmen des Projekts an der Universität Debrecen errichtete Photovoltaik-Anlage mit 9 kW_p ist aktuell noch eine der größten Anlagen mit Netzeinspeisung in Ungarn.

Mit der Anlage soll die Praxistauglichkeit von Photovoltaikanlagen potenziellen Nutzern und Betreibern demonstriert werden. Das zweite Ziel ist es, die Anlage im Rahmen von Übungen zu Vorlesungen vorzustellen, einen Praktikumsplatz zur Durchführung von Experimenten einzurichten und so zur praktischen Ausbildung von jungen Ingenieuren an der Universität Debrecen einzusetzen.

2. Rahmenbedingungen des Demonstrationsprojekts

2.1 Durchführende Institution Universität Debrecen

Die heutige Universität Debrecen mit einer Studentenzahl von etwa 25.000 entstand im Jahre 2000 durch Zusammenlegung von drei verschiedenen Universitäten. Das Agrarzentrum ist Teil der neuen Universität und Rechtsnachfolger der ehemaligen agrarwissenschaftlichen Universität Debrecen. Sie hat zwei Fakultäten, die Fakultät für Agrarwissenschaften und Agrarwirtschaft sowie die Fakultät für Landesentwicklung. Die Agrarwissenschaften bestehen aus 17 und die Agrarwirtschaft aus 10 Lehrstühlen. Momentan kann man am Agrarzentrum zwischen folgenden Studiengängen wählen:

- Fachhochschulstudium
- Hochschulstudium
- Universitäre Weiterbildung
- Promotion

Im Rahmen des Fachhochschulstudiums mit dem Abschluss Agraringenieur können die Studenten zwischen den Fachrichtungen - Gartenbau, Fachrichtung Wirtschaft, Fachrichtung Tierproduktion und Naturschutz - wählen.

Die Integration erneuerbarer Energien in die Ausbildung an der landwirtschaftlichen Fakultät ist besonders wichtig, da der Energieträger Biomasse zukünftig einen wichtigen Produktionszweig sein wird und die direkte Nutzung solarer Energie auf Grund der verfügbaren großen Dachflächen bei landwirtschaftlichen Gebäuden besondere Bedeutung hat. Bei Photovoltaik ist hier neben der Netzeinspeisung auch die netzferne Stromversorgung (Inselssysteme) für landwirtschaftliche Anwendungen wie Bewässerung oder Fischteichbelüftung etc. von Inte-

resse. Durch das Einbeziehen dieser Techniken in die Ausbildung werden die Studenten bereits frühzeitig damit vertraut und können sie später in der beruflichen Praxis nutzen.

Der Lehrstuhl für Landtechnik der Universität Debrecen beschäftigt sich seit 2002 mit erneuerbaren Energien. Die Planung sieht vor Demonstrationsanlagen für verschiedene erneuerbare Energietechniken aufzubauen und diese in die studentische Ausbildung einzubinden. Im Rahmen von Forschungsaktivitäten sollte ihr praktischer Einsatz in der Landwirtschaft untersucht werden. Durch entsprechende Beratungstätigkeit soll auch das Bewusstsein der Bevölkerung zur Umweltschonung und dem Einsatz erneuerbarer Energien gestärkt werden.

Mit der Photovoltaikanlage wird eine Demonstrationsanlage realisiert. Durch die kontinuierliche Vermessung der netzgekoppelten Anlage mit einer installierten Spitzenleistung von ca. 9 kW_p mit drei verschiedenen Solarzellentypen sammeln Studenten eigene praktische Erfahrungen für den Einsatz von PV-Anlagen.

2.2 Organisation und Projektabwicklung

Das Vorhaben umfasst Planung, Bau und Betrieb der Anlage. Die notwendigen Arbeitsschritte sollen in enger Zusammenarbeit von ZAE Bayern und Universität Debrecen erfolgen, um ein Maximum an Know-how-Transfer zu gewährleisten. Die Anlage dient sowohl der Ausbildung von Studenten als auch zur Demonstration photovoltaischer Stromerzeugung.

Das Vorhaben war als deutsch-ungarisches Kooperationsprojekt mit öffentlicher Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter starker Beteiligung deutscher und ungarischer Industrieunternehmen angelegt. Der Projektbeginn 2001 fiel in die große politische und wirtschaftliche Umbruchphase in Ungarn. In dieser Zeit erfolgte eine komplette Umstrukturierung der Universität Debrecen, in der mehrere Universitäten und Fachhochschulen zusammengelegt wurden. Dadurch bedingt war an der Universität Debrecen auch ein Wechsel personeller Zuständigkeiten erforderlich. Die Projektleitung wurde von der Universitätsleitung schließlich an Herrn Dr. Gabor Grasselli vom Lehrstuhl für Landtechnik übertragen. Die Strukturveränderungen machten die Organisation sehr schwierig und führten insbesondere zu erheblichen zeitlichen Verzögerungen bei der Realisierung der Anlage.

Nach Klärung von Details durch die Projektleitung wurde schließlich Ende 2002 ein Kooperationsvertrag zwischen der Universität Debrecen und dem ZAE Bayern geschlossen, in dem die Aufgaben, Tätigkeiten und Finanzierungsbeiträge der Partner geregelt sind. Das Projekt wurde finanziert durch folgende Institutionen und Firmen finanziert:

- Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)
- Solarenergieförderverein e.V. München
- Fa. Solartechnik Ackermann, Haimhausen
- Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern)
- E.On Hungaria AG
- Transelektro AG
- Universität Debrecen

Bedingt durch den damals laufenden Beitritt von Ungarn zur Europäischen Union konnte das Projekt leider nicht, wie ursprünglich geplant, durch das ungarische Wirtschaftsministerium gefördert werden.

2.3 Beschreibung des Standortes Debrecen

Geographische Lage

Debrecen liegt auf 47°30' nördlicher Breite und 21°37' östlicher Länge. Mit seinen etwa 210.000 Einwohnern ist es die zweitgrößte Stadt Ungarns. Sie liegt etwa 220 km von Budapest entfernt im Osten Ungarns in der nördlichen Tiefebene auf 111 m über NN.

Die Region Debrecen mit ihrem hochwertigen Ackerland ist stark landwirtschaftlich geprägt. Daher spielt die Nahrungsmittelindustrie in der wirtschaftlichen Struktur der Stadt und ihrer Umgebung traditionell eine wichtige Rolle. Dies begründet auch die starke Position der landwirtschaftlichen Fakultät an der Universität Debrecen.

Klima

Das Klima im Osten Ungarns ist gemäßigt kontinental. Die jährliche mittlere Umgebungstemperatur beträgt 9,9 °C, wobei der Januar mit einem Temperaturmittel von -2,6 °C der kälteste Monat und der Juli mit einem Mittelwert von 20,3 °C der heißeste Monat ist. Im Vergleich (siehe Abb. 2.1) zu Süddeutschland (München) sind die Sommer in Debrecen erheblich länger und wärmer, während die Winter kürzer und etwas kälter sind. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt für Debrecen 9,9 °C, für München nur 7,7 °C.

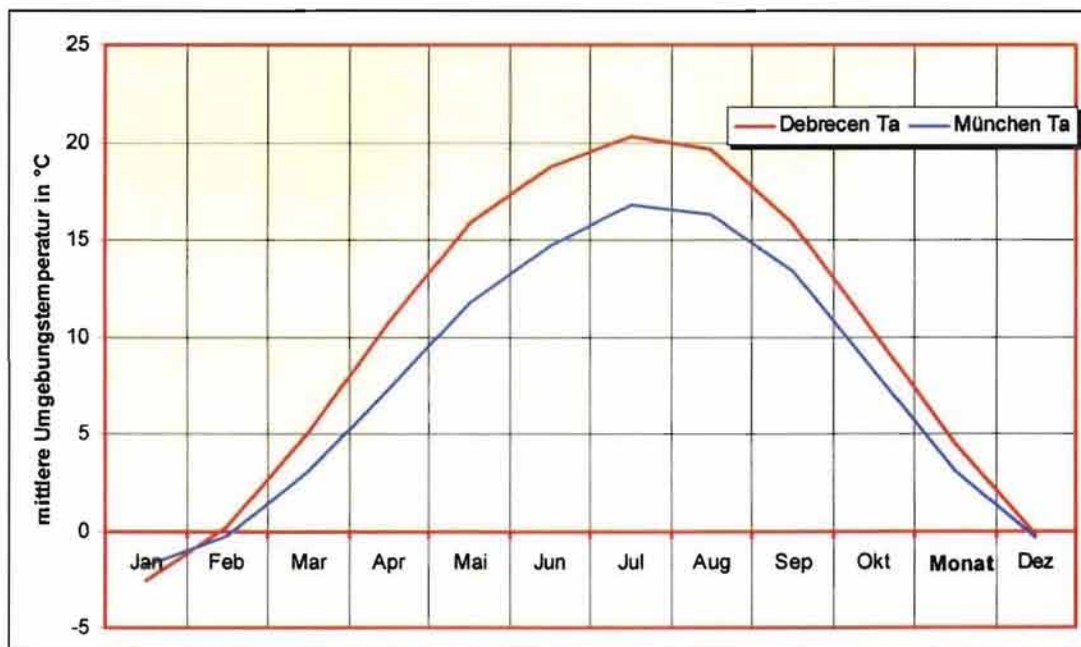


Abb. 2.1: Monatsmittel der Umgebungstemperatur für Debrecen und München (Datenquelle: Meteonorm Vers. 4.0)

Mit einer jährlichen Niederschlagsmenge von 566 mm ist das Gebiet wesentlich trockener als München mit 817 mm.

Die jährliche Globalstrahlung auf die Horizontalfläche beträgt in Debrecen 1288 kWh/m²/a bei 1982 Sonnenscheinstunden. Die Vergleichswerte für München liegen bei 1143 kWh/m²/a für die horizontale Globalstrahlung und bei 1666 Sonnenscheinstunden. Die jährliche Globalstrahlung liegt in Debrecen damit um fast 13 % höher als in München. Ein Vergleich von Monatswerten der Strahlungsdaten beider Standorte ist in Abb. 2.2 und Abb. 2.3 zu sehen.

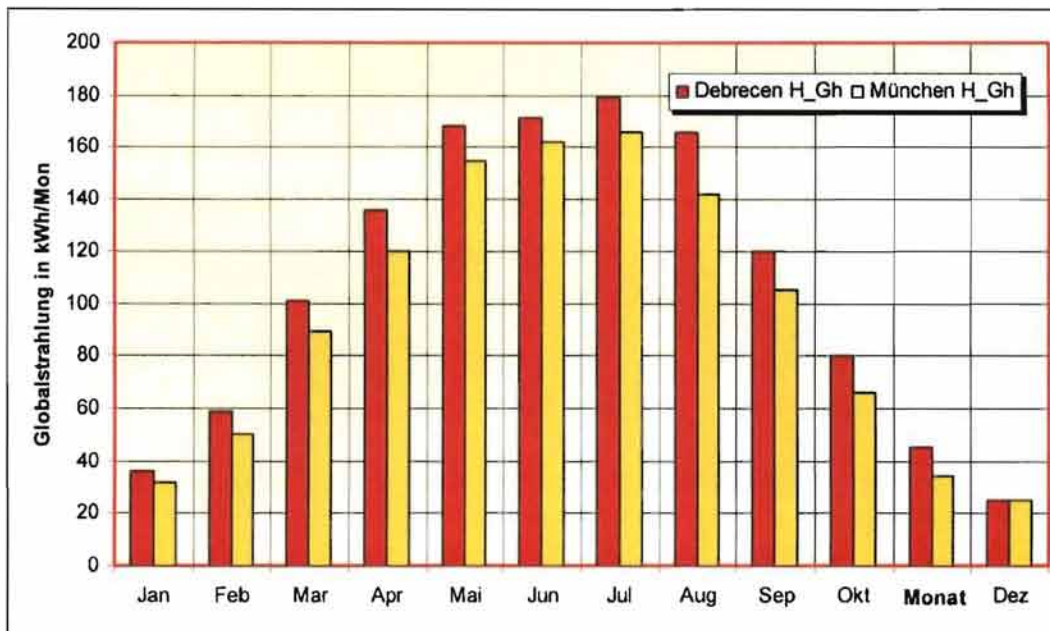


Abb. 2.2: Strahlungssumme der horizontalen Globalstrahlung für Debrecen und München (Datenquelle: Meteororm Vers. 4.0)

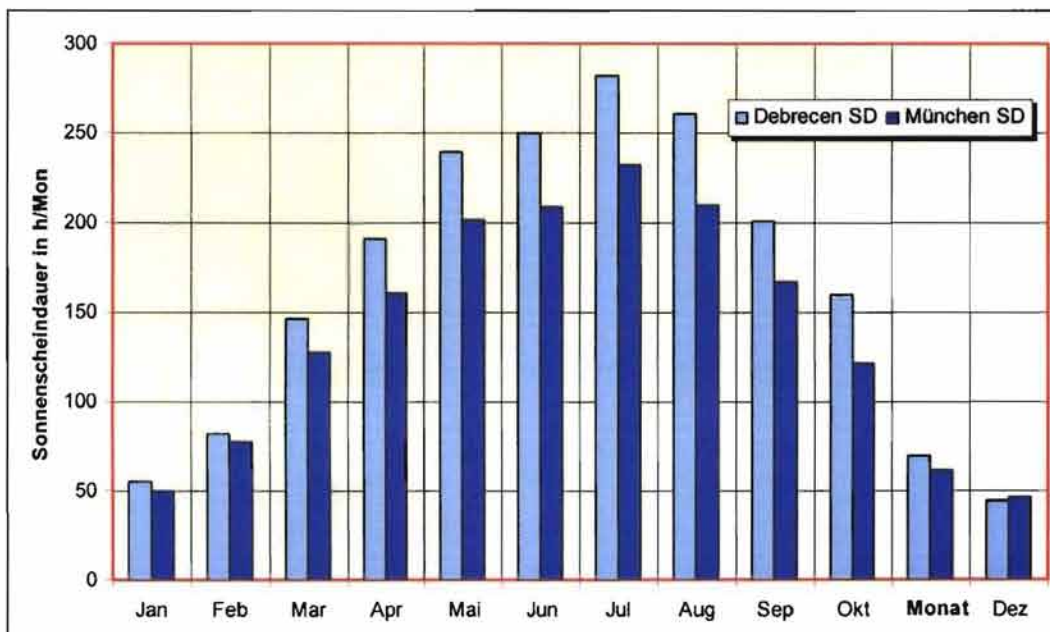


Abb. 2.3: Monatswerte der Sonnenscheinstunden für Debrecen und München (Datenquelle: Meteororm Vers. 4.0)

3. Demonstrationsanlage

3.4 Technisches Konzept der Anlage

Die Photovoltaikanlage an der Universität Debrecen ist als netzgekoppelte, auf einem Flachdach aufgeständerte Anlage konzipiert. Um die Vielfalt der heute verfügbaren Technik zu demonstrieren, wurde sie in drei Felder unterschiedlicher Zelltypen und Hersteller unterteilt.

In der ursprünglichen Planung war der Einsatz von monokristallinen und amorphen Siliziumzellen sowie CIS-Zellen vorgesehen. Wegen Lieferengpässen von monokristallinen Solarmodulen im Herbst 2003 wurde auf polykristallines Material ausgewichen.

Es wurden jetzt 24 Module Kyocera KC120 (120 W_p Spitzenleistung) aus polykristallinem Silizium, 72 Siemens ST40 (40 W_p Spitzenleistung) CIS-Solarmodule und 72 Dunasolar DS40 Module (40 W_p Spitzenleistung) aus amorphem Silizium installiert. Jedes Modulfeld hat so eine Spitzenleistung von 2,88 kW_p, insgesamt sind es 8,64 kW_p. Bei den Dunasolar-Modulen handelt es sich um Restbestände von amorphen Siliziummodulen, die in Ungarn hergestellt wurden. Die Firma Dunasolar ein amerikanisch-ungarisches Joint Venture Unternehmen wurde 1997 in Budapest gegründet. Sie war einer der größten Hersteller von a-Si □ Modulen in Europa. Allerdings wurde die Fertigung Ende 2003 eingestellt.

Jedes Feld hat einen eigenen Wechselrichter, so dass alle drei Solargeneratoren voneinander völlig unabhängig sind. Die Ausgänge der Wechselrichter sind zusammengefasst und an das Netz gekoppelt. Die erzeugte elektrische Energie wird direkt in das vorhandene Niederspannungsnetz eingespeist. Leistungselektronik, Anlagensteuerung und die nötigen Messeinrichtungen wurden im zum Dach gehörigen Gebäude untergebracht.

Bei der Projektierung dieser insgesamt 110 m² umfassenden Photovoltaikanlage wurde größter Wert auf innovative Lösungen und kostenoptimierte Ausführung gelegt. Die Module sind auf Traggestellen mit einer Neigung von 30° direkt nach Süden ausgerichtet. Damit ist eine dem Standort und den Umgebungsbedingungen entsprechende ganzjahresoptimierte Aufstellung gewährleistet. Die statische Tragfähigkeit des Daches wurde geprüft und war ohne besondere Maßnahmen ausreichend für die Installation der Anlage geeignet.

Es handelt sich um eine Demonstrationsanlage, die auch bei der Ausbildung von Studenten eingesetzt wird. Für Ausbildungszwecke ist ein Praktikumsplatz für Studenten vorgesehen. An ihm können praktische Übungen durchgeführt werden. Die Messdaten der Anlage werden für die Öffentlichkeit im Zentralgebäude der Universität visualisiert.

Verschaltung der Solarmodule

Die elektrische Verschaltung der einzelnen Solarmodule (Tabelle 3.1) erfolgte auf der Gleichstromseite in Reihe bis auf ein Spannungsniveau von 400 - 600 V. Die einzelnen Reihen wurden dann parallel verschaltet. Durch die höhere Spannung können die Kabelquerschnitte entsprechend klein gehalten werden.

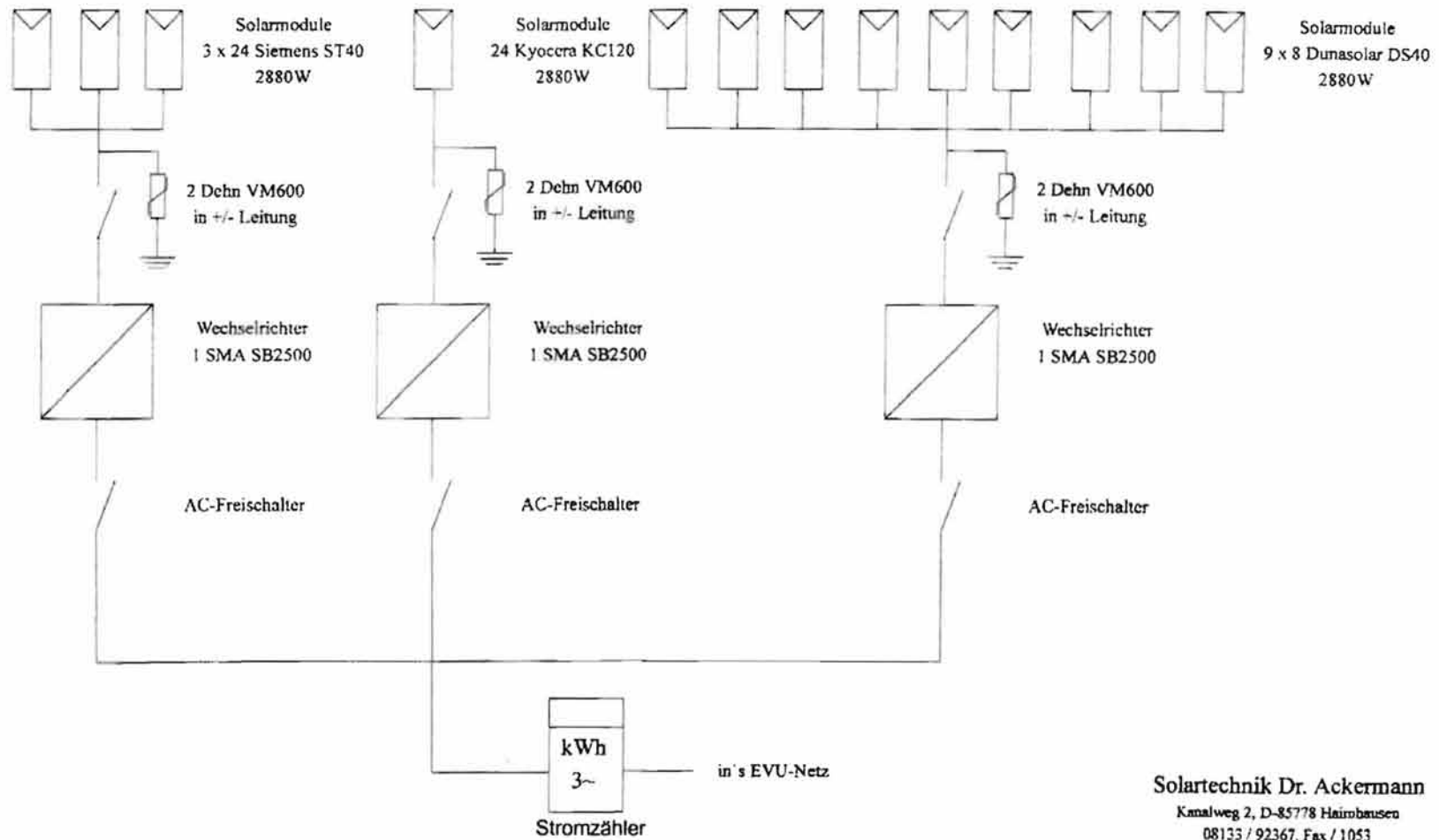
Tabelle 3.1: Verschaltung der Solarmodule

Modultyp	Gesamtfläche	Verschaltung
Kyocera KC120	22,23 m ²	24 Module in Reihe
Siemens ST40	30,65 m ²	3 Reihen parallel mit je 24 Modulen in Reihe
Dunasolar DS40	56,92 m ²	9 Reihen parallel mit je 8 Modulen in Reihe

PV-Anlage - Universität Debrecen

Nennleistung 8,64 kW

Inbetriebnahme 2004



Solartechnik Dr. Ackermann

Kanalweg 2, D-85778 Haimhausen

08133 / 92367, Fax / 1053

Abb. 3.1:

Schaltplan zur Photovoltaikanlage an der Universität Debrecen
(Bildquelle: Solartechnik Dr. Ackermann)

Für die Verkabelung im Freien wurde nur sehr hochwertiges Material (Titanex 11, H07 RN-F 1x6) verwendet, um eine hohe Lebensdauer zu gewährleisten. Die Kabel wurden auf dem Dach in Edelstahlwellrohr und Blechkanälen bis ins Gebäude geführt, dort erfolgte die Verlegung in einem Kabelkanal aus Kunststoff.

Die gesamte Systemtechnik wurde in einem eigens dafür eingerichteten Schaltraum im Gebäude selbst untergebracht. Hier befinden sich die Überspannungsableiter, die Wechselrichter und der Netzeinspeisepunkt. Im Schaltraum ist auch die Datenerfassung untergebracht.

Wie im Schaltplan in Abb. 3.1 gezeigt, ist auf der Gleichspannungsseite in der Verbindungsleitung zwischen Modulen und Wechselrichter jeweils in der (+)-Leitung und in der (-)-Leitung ein Überspannungsableiter (Dehn VM600) und ein DC-Schalter (Typ: ABB 280UC-B16 mit Funkenlöschung durch Permanentmagnet) eingebaut. Die Netzfreeschaltung (AC-Trennung) erfolgt über einen Leitungsschutzschalter (Typ: ABB Leitungsschutzschalter B16).

3.5 Montagegestelle der Solargeneratoren

Die Montagegestelle für die Solarmodule wurden gemäß den Gegebenheiten des Dachs von einem örtlichen Handwerksbetrieb aus Stahl gefertigt und verzinkt. Die Photovoltaik ist in Ungarn noch nicht so populär wie in Deutschland, deshalb gibt es noch keine Standardkomponenten für Unterkonstruktion. Um auch im Land selbst eine Wertschöpfung aus dem Projekt zu ziehen, wurde auf den Import der Gestelle verzichtet.

Eine Schnittzeichnung der Gestelle ist in Abb. 3.2 zu sehen. Sie sind ihrerseits auf Trapezblechprofilen befestigt, um die Beschädigung der Dachhaut zu vermeiden. Der Abstand zwischen zwei Reihen beträgt etwa 8 m, so dass eine Verschattung der nächsten Modulreihe auch im Winter bei niedrigem Sonnenstand in jedem Fall vermieden wird. Die Abb. 3.3 zeigt die Gestelle vor Montage der Module.

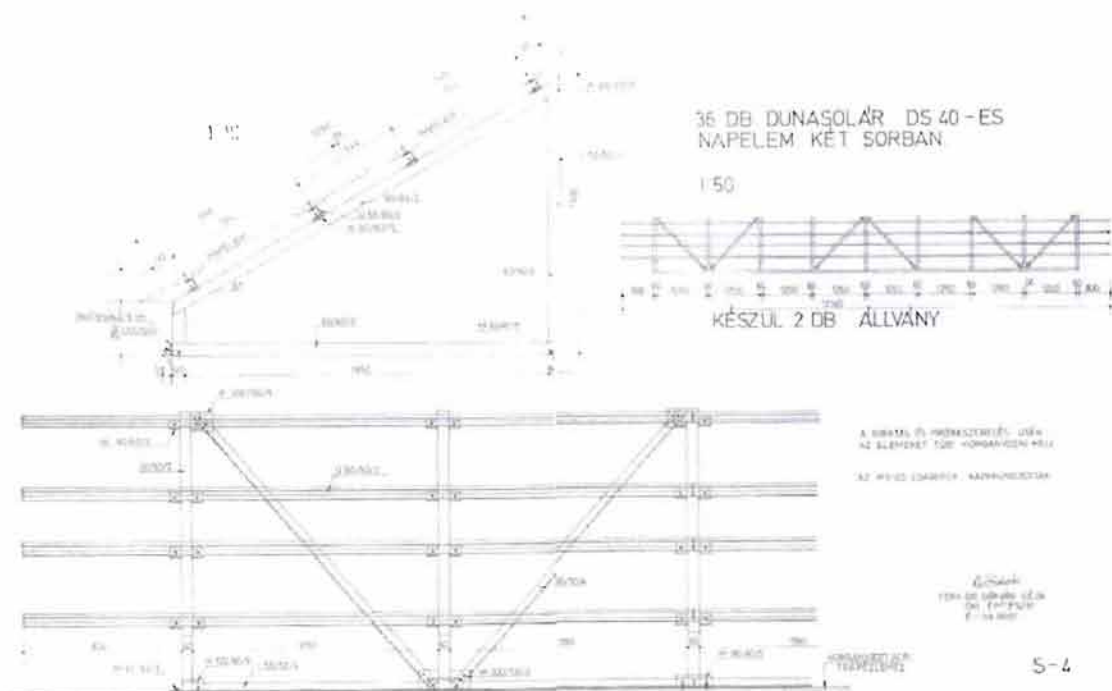


Abb. 3.2: Schnittzeichnung des Gestells für die Solarmodule (Bildquelle: Universität Debrecen)



Abb. 3.3: Traggestelle für die Solarmodule
(Bildquelle: Universität Debrecen)

3.6 Solargeneratoren

Die Photovoltaikanlage wurde auf dem Flachdach einer Maschinenhalle des Lehrstuhls für Landtechnik errichtet. Im Gebäude selbst wurde ein Raum abgetrennt, in dem die übrige System- und Messtechnik untergebracht wurde. Dort befindet sich auch der Einspeisepunkt in das Stromnetz.

Die Gesamtanlage ist in drei unabhängige Teilanlagen gleicher Leistung unterteilt. Sie unterscheiden sich nur in den verwendeten Typen von Solarzellen und damit in der Modulfläche. Die Solarmodule sind in vier parallelen Reihen mit einem Neigungswinkel von 30° installiert. Auf der südlichsten Reihe mit einer Gesamtlänge von 12,60 m sind die 72 Module mit den CIS Dünnschichtzellen (Siemens¹ ST40) montiert. Die dahinter liegende zweite und dritte Reihe mit einer Länge von jeweils 12,11 m ist mit den 72 amorphen Siliziummodulen von Dunasolar (DS 40) belegt. Auf der nördlichen 8,15 m langen Reihe wurden 24 Kyocera KC 120 Module mit polykristallinen Siliziumzellen installiert.

3.6.1 Polykristalline Solarmodule

Die Zellen der Kyocera KC 120 Module /Lit. 1/ sind zum Schutz gegen Bewitterung zwischen einer gehärteten Glasabdeckung und EVA-Vergussmasse eingebettet und rückseitig mit PVF-PET-PVF Mehrschicht-Verbundfolie versiegelt. Dieses Laminat ist in einem stabilen Aluminiumrahmen eingefasst. Kyocera gibt für die verwendeten polykristallinen Si-Solarzellen mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm einen Wirkungsgrad von bis zu 15%

¹ Die Firma Siemens Solar wurde in der Projektlaufzeit an Shell verkauft und firmiert jetzt unter Shell Solar. Die Typenbezeichnung wie ST40 wurde beibehalten. Im Rahmen dieses Berichtes wird die Modulbezeichnung Siemens ST40 beibehalten.

an. Die technischen Daten laut Datenblatt sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt. Ein Foto dieser polykristallinen Siliziummodule ist in Abb. 3.4 zu sehen.



Abb. 3.4: Foto der Reihe polykristalliner Solarmodule Kyocera KC120
(Bildquelle: Universität Debrecen)

Tabelle 3.2: Technische Daten der polykristallinen Kyocera KC 120 Module

Elektrische Kennwerte	
Nennleistung P_{max}	120 W (+/- 5%)
Spannung bei P_{max}	16,90 V
Strom bei P_{max}	7,10 A
Leerlaufspannung	21,50 V
Kurzschlussstrom	7,45 A
Sonstige Daten	
L x B x H Rahmen/Dose	1425 x 652 x 36/56 mm
Gewicht	11,9 kg
Leistungsgarantie	Für 25 Jahre mindestens 80% der Anfangsleistung
Rahmen- / Zellenfarbe	silbern / blau

3.6.2 CIS - Solarmodule

Das Solarmodul ST40 von Siemens /Lit. 2/ ist durch seine robuste Ausführung für Anwendungen auch unter harten Umgebungsbedingungen geeignet. Es besteht aus in Reihe geschalteten Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)-Solarzellen (technische Daten siehe Tabelle 3.3). Diese mehrschichtigen Zellen sind ein Produkt der PowerMax®-Dünnschichttechnologie von

Siemens und zeichnen sich durch die Ausnutzung eines breiten Lichtspektrums und hohe Zuverlässigkeit bei gleichzeitig langer Lebensdauer aus. Das Solarmodul ST40 erreicht einen ähnlich hohen Wirkungsgrad wie kristalline Si-Photovoltaikmodule. Es ist als ein langlebiges und in der Anwendung einfaches Produkt konzipiert und wird unter strengsten Qualitätskontrollen in nach ISO 9001 zertifizierten Produktionsstätten hergestellt. Ein Aluminiumrahmen schützt den Glas-/Folienverbund, in dem das CIS-Substrat eingebettet und elektrisch isoliert ist. Ein Foto dieser Modulreihe zeigt Abb. 3.5.



Abb. 3.5: Foto der Reihe CIS-Solarmodule Siemens ST40 (Bildquelle: Universität Debrecen)

Tabelle 3.3: Technische Daten der CIS-Module Siemens ST40

Elektrische Kennwerte		
Nennleistung P_{max} ¹⁾	[Wp]	38
Nennstrom IMPP	[A]	2,29
Nennspannung UMPP	[V]	16,6
Kurzschlussstrom ISC	[A]	2,59
Leerlaufspannung UOC	[V]	22,2
Thermische Kennwerte		
NOCT ²⁾	[°C]	47±2
Temperaturkoeffizient des Kurzschlussstromes		0,26 mA / K
Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung		-0,1 V / K
Grenzwerte /Qualifikationen		
maximal zulässige Modultemperatur	[°C]	-40 bis +85
maximal zulässige Systemspannung	[V]	600
Flächendruck	[N/m ²]	2400
maximale Verwindung ³⁾	[°]	1,2

Hagelschlag / Hagelkörner		1,0 / 25
	[m/s]	v = 23
Gewicht	[kg]	7,02
¹⁾ W _p (Watt peak) = Spitzenleistung unter Standard-Testbedingungen:	(Minimalleistung 34,2 W _p) Luftmasse (Air Mass) AM = 1,5 Einstrahlung E = 1000 W/m ² Zellentemperatur T _C = 25 °C	
²⁾ Normale Zellen-Betriebstemperatur bei:	Einstrahlung E = 800 W/m ² Umgebungstemperatur T _A = 20 °C Windgeschwindigkeit v = 1 m/s	
³⁾ diagonale Abhebung der Modulebene		

3.6.3 a-Si - Solarmodule

Beim Solarmodul DS40 von Dunasolar handelt es sich um amorphe Siliziumsolarzellen (a-Si), die zwischen zwei Glasscheiben eingebettet sind. Dadurch wird eine hohe mechanische Stabilität erreicht. Die Kenndaten laut Datenblatt /Lit. 3/ sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst, ein Foto ist in zu Abb. 3.6 sehen.



Abb. 3.6: Foto einer Reihe a-Si-Solarmodule Dunasolar DS40
(Bildquelle: Universität Debrecen)

Tabelle 3.4: Technische Daten der amorphen Solarmodule DS40 von Dunasolar

Elektrische Kennwerte		
Nennleistung P _{max} 1)	[Wp]	40
Nennstrom IMPP	[A]	1,1
Nennspannung VMPP	[V]	40
Kurzschlussstrom ISC	[A]	1,3
Leerlaufspannung VOC	[V]	62,2
Gewicht	[kg]	13

3.7 Wechselrichter

In jeder Teilanlage wird ein einphasiger Wechselrichter für Netzeinspeisung Typ Sunny Boy der Firma SMA eingesetzt. Auf diese Weise ist ein unabhängiger Betrieb der Teilanlagen voll gewährleistet. Die Wechselrichter genügen den hohen deutschen Standards für diese Geräte, obwohl in Ungarn die Anforderungen diesbezüglich soweit heute vorhanden noch relativ niedrig sind. Die Einspeisung erfolgt direkt in das Niederspannungsnetz der Universität.

Das Konzept der Sunny Boy String-Wechselrichter von SMA sieht vor, dass nur eine gewisse Anzahl von in Reihe geschalteten Modulen (Strings) mit dem Versorgungsnetz gekoppelt wird. Ein größerer Solargenerator, der wie hier bei dieser PV-Anlage an der Universität Debrecen noch dazu aus unterschiedlichen Solarmodulen besteht, kann so aus einzelnen Strings mit jeweils einem eigenem String-Wechselrichter aufgebaut werden. Die Zusammenfassung der Leistung erfolgt erst auf der Wechselstromseite. Die teure und aufwändige Gleichstromverteilung früherer Photovoltaik-Anlagen entfällt damit.

Tabelle 3.5: Technische Daten des eingesetzten Wechselrichters SB2500

Eingangsgrößen (DC-Seite)	TYP SB2500
Max. Eingangsspannung U_{PV0}	600 V DC
Eingangsspannung, MPP-Bereich: U_{PV}	224 - 550 V DC
Max. Eingangsstrom: I_{PVmax}	12,0 A
Max. Eingangsleistung P_{PV}	2700 W
Empfohlene max. Generatorleistung	3450 W _p
Überspannungsschutz:	thermisch überwachte Varistoren
Verpolungsschutz:	durch Kurzschlussdiode
AUSGANGSGRÖßEN (NETZANSCHLUSS)	
Ausgangsnennleistung: P_{ACNenn}	2200 W
Ausgangsspitzenleistung: P_{ACmax}	2500 W
Allpolige Trenneinrichtung netzseitig:	selbsttätige Freischaltstelle (ENS), doppelte Ausführung
Wirkungsgrad	
Max. Wirkungsgrad: $\%_{max}$	94 %
Europäischer Wirkungsgrad: $\%_{euro}$	93 %

Die hier eingesetzten Typen SB2500 eignen sich für PV-Anlagen bis zu einer Spitzenleistung von 3,45 kW_p. Einige wichtige technische Daten gemäß der technischen Beschreibung zum Gerät /Lit. 4/ sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst.

Beim Sunny Boy SB2500 handelt es sich um einen Wechselrichter mit einem robust aufgebauten Leistungsteil mit sehr hoher Verfügbarkeit und hohem Wirkungsgrad. Die Gleichspannung wird hochfrequent (16 kHz) in einem Zwischenkreis in Wechselspannung umge-

setzt. Aus diesem erfolgt dann die Netzeinspeisung über einen Ringkerntransformator. Ein Prinzipschaltbild des Wechselrichters ist in Abb. 3.7 zu sehen

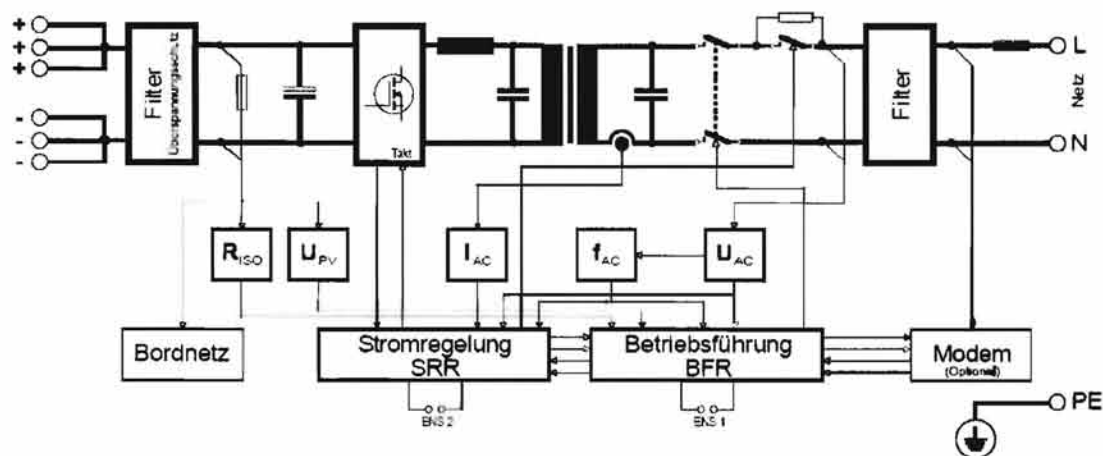


Abb. 3.7: Blockschaltbild des Wechselrichters Sunny Boy SB2500 (Bildquelle: /Lit. 4/)

Die nachfolgenden technischen Beschreibungen stellen eine Kurzfassung der Ausführungen in /Lit. 4/ dar.

Das Gerät wird über einen internen Einchipcomputer geregelt. Auf diese Weise kann die Sinusform der Ausgangsspannung bei sehr kleinem Klirrfaktor gewährleistet werden. Durch die parallele Netzüberwachung durch zwei unabhängige Einchipcomputer werden die Einspeiserichtlinien des VDEW und der Berufsgenossenschaft (Messung der Netzimpedanz, ENS) voll erfüllt. Zudem erfolgt im vollautomatischen Betrieb ein MPP-Tracking (Maximum Powerpoint-Tracking). Weiterhin übernimmt die Betriebsführung die Kommunikation mit der Messdatenerfassung Sunny Boy Control.

Ein wichtiger Punkt ist die automatische, selbsttätige Freischaltung der Netzeinspeisung durch den Sunny Boy, wenn das EVU einen Teil seines elektrischen Verbundnetzes freischaltet. Um maximale Sicherheit zu gewährleisten, ist dies mit zwei voneinander unabhängigen Einrichtungen zur Netzüberwachung mit jeweils zugeordnetem Schaltorgan (ENS) in Reihe aufgebaut. Jede dieser ENS überwacht kontinuierlich die Qualität des angeschlossenen Netzes durch Prüfung von Spannung, Frequenz und Impedanz. Durch die Redundanz und einen automatischen Selbsttest vor jeder Netzzuschaltung wird eine sehr hohe Funktionssicherheit erreicht.

Die Signalübertragung zwischen dem Sunny Boy, dem Sunny Boy Control und weiter zum PC über die Netzanschlussleitung und eine RS232 Schnittstelle (siehe Abb. 3.8) minimiert den Installationsaufwand. Im Sunny Boy ist ein Powerline-Modem zur Datenübertragung notwendig. Das entsprechende Steckermodem (SWR-COM) ist in dem bei dieser Anlage eingesetzten Controller für PV-Anlagen, dem Sunny Boy Control, bereits integriert. Für eine Kommunikation mit allen der drei eingebauten Sunny Boy Wechselrichter, die jeweils an einer eigenen Phase hängen wurden Phasenkoppler installiert. Der Sunny Boy Control verfügt zusätzlich über analoge und digitale Eingangskanäle, über die Größen wie z.B. die Wetterdaten und Modultemperaturen gemessen und aufgezeichnet werden. Auf weitere Details der Messdatenerfassung wird später noch eingegangen.

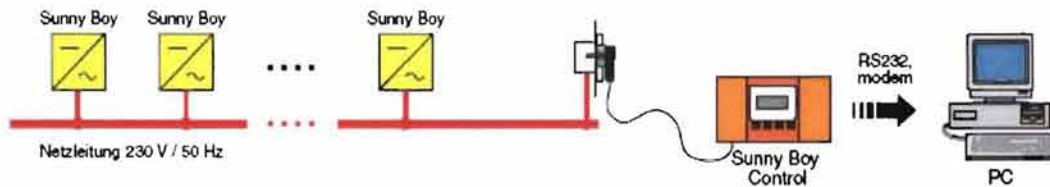


Abb. 3.8: Prinzip der Datenübertragung von den Wechselrichtern an den Sunny Boy Control und weiter an den PC (Bildquelle: /Lit. 5/)

3.8 Messtechnik

Nachdem die Anlage zur Demonstration der Technologie und zur Aus- und Weiterbildung von Studenten vorgesehen ist, wurde sie mit einer umfangreichen Messdatenerfassung ausgerüstet. Wegen der eingesetzten unterschiedlichen Zellentypen sollte jedes Feld für sich vermessen werden. Die beinhaltet elektrische Messgrößen auf der Gleich- und auf der Wechsellspannungsseite. Zusätzlich werden für eine Beurteilung der Modulleistungsfähigkeit verschiedene meteorologische Größen benötigt. Die Daten müssen in geeigneter Weise verknüpft, gespeichert und aufbereitet werden.

3.8.1 Messwerterfassung der Photovoltaik-Anlage

Der Bedarf elektrische Größen aus den Anlagen zu erfassen wurde bereits bei der Auswahl der Wechselrichter berücksichtigt. Zur Erfüllung der umfangreichen Regelaufgaben werden im Wechselrichter bereits alle zur Anlagenbeurteilung erforderlichen Größen gemessen. Sie müssen somit lediglich abgerufen, gespeichert und aufbereitet werden. Diese Aufgabe übernimmt die intelligente Messdatenerfassungs- und Diagnoseeinheit Sunny Boy Control Plus, mit der zusätzlich Messungen an externen Sensoren z.B. für Temperaturen oder solare Einstrahlung durchgeführt werden können. Die nachfolgenden Beschreibungen fassen die ausführliche Dokumentation /Lit. 5/ zusammen.

Der Datenaustausch zwischen dem Wechselrichter SB2500 und dem Sunny Boy Control Plus erfolgt über die Netzleitung. Die von jedem der drei Solargeneratoren zur Verfügung stehenden elektrischen Messkanäle sind in nachfolgender Tabelle 3.6 zusammengestellt. Über die rein elektrischen Größen hinaus wird zur Identifikation die Seriennummer des Wechselrichters ausgegeben, der aktuelle Betriebszustand angezeigt und ggf. die Fehlerart im Störfall mitgeteilt.

Die Zuleitungen zu den externen Sensoren zur Erfassung der meteorologischen Größen werden direkt am Sunny Boy Control angeschlossen. Dort werden die Daten mit den elektrischen Messgrößen zusammengeführt und an den PC übergeben.

Tabelle 3.6: Übersicht der elektrischen Messkanäle der drei Solargeneratoren

Messkanal	Kurzbezeichnung
PV-Eingangsspannung	Upv-Ist
PV-Sollspannung des internen Upv-Reglers	Upv-Soll
Netzstrom	Iac-Ist
Netzspannung	Uac
Netzfrequenz	Fac
abgegebene Netzleistung	Pac
Netzimpedanz	Zac
Isolationswiderstand	Riso
Strom aus dem PV-Generator	Ipv
Gesamtsumme der eingespeisten Energie	E-Total
Gesamtsumme der Betriebsstunden im Einspeisebetrieb	h-Total
Gesamtsumme der Netzzuschaltungen	Netz-Ein
Seriennummer des Sunny Boy	Seriennummer
Anzeige des aktuellen Betriebszustandes	Status
Anzeige der Fehlerart im Status „Störung“	Fehler

Für externe Sensoren stehen sechs analoge Eingänge mit einzeln konfigurierbarem Messbereich zwischen ± 10 mV und ± 10 V zur Verfügung, sie können darüber hinaus auch als ± 20 mA Stromeingänge genutzt werden. Zwei weitere analoge Eingänge sind für Pt100-Temperaturfühler in Vierleitertechnik geeignet. Einer dieser Eingänge wird für die Erfassung der Temperatur eines CIS-Solarmoduls verwendet.

Weiterhin besitzt das Gerät acht digitale Eingänge und acht digitale Ausgänge. Damit bietet der Sunny Boy Control Plus exzellente Voraussetzungen zur Datenerfassung und Anlagenüberwachung und wird auch entsprechend eingesetzt. Auf die ursprüngliche geplante mobile Meteostation des ZAE Bayern wurde verzichtet, da die Kommunikation beider Messsysteme nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren gewesen wäre. Diese Lösung hätte zudem keinen zusätzlichen technischen Vorteil für das Projekt gebracht.

Der Sunny Boy Control Plus ist über eine weitere serielle Schnittstelle mit einem PC verbunden, auf dem die auflaufenden Messdaten der Anlage und Wetterdaten gespeichert, ausgewertet und graphisch dargestellt werden.

Ein weiterer Vorteil des Sunny Boy Control Plus ist die Möglichkeit über die seriellen Schnittstellen permanent externe Großdisplays (Anzeigetafel) anzuschließen. Die mitgelieferten Displays sind momentan noch im Technikraum montiert und sollen zu einem späteren Zeitpunkt zur Visualisierung aktueller Messdaten (z.B. Gesamtenergie, momentane Leistung und Einstrahlung) für eine breitere Öffentlichkeit im Zentralgebäude der Universität in einer Schautafel untergebracht werden. Diese erhält dabei vom Anlagencontroller kontinuierlich den ins Netz eingespeisten Leistungswert und zeigt ihn auf einem Display an.

In Abb. 3.9 ist ein Foto des Technikraums zu sehen. Es zeigt neben dem Netzeinspeisepunkt im Schaltkasten (linker Bildrand) die drei Wechselrichter und den Sunny Boy Control Plus (links unten).



Abb. 3.9: Technikraum mit Wechselrichter (Bildquelle: Universität Debrecen)

3.8.2 Messwerterfassung der Meteorologiestation

Die wichtigste meteorologische Größe zur Beurteilung der Leistung der Photovoltaikanlagen ist die Solarstrahlung. Hierfür wurde ein Pyranometer der Fa. Kipp&Zonen Typ CM11 mit den technischen Spezifikationen gemäß

Tabelle 3.7 eingesetzt.

Tabelle 3.7: Technische Spezifikationen des Pyranometers CM11

Messbereich	0 - 1400 W/m ²
Empfindlichkeit	4 - 6 μ V/W/m ²
Spektralbereich	0,3 - 2,8 μ m
Nichtlinearität	\pm 0,6 % < 1000 W/m ²
Innenwiderstand	700 - 1500 Ohm
Zeitkonstante	1/e 4 s; 99% 24 s
Sensortyp	100 Thermoelemente
Umgebungstemperatur	- 40 bis + 80 °C

Das Strahlungsmessgerät wurde, wie in Abb. 3.10 zu sehen, hinter der ersten Modulreihe aufgestellt. Es wurde zunächst horizontal montiert und später in Modulebene geneigt, um das aufwändige Umrechnen der Strahlungsleistung zu vermeiden.

Als Sensor zur Messung der Umgebungstemperatur wird ein Pt100 (nach IEC 751 1/3 Klasse B ($\pm 0,1$ K)) eingesetzt. Der Sensor steckt in einem mit Zwangsventilation ausgerüsteten Schutzgehäuse (Abb. 3.11), um Fehler durch Witterungseinflüsse und Strahlung zu vermeiden. Die gesamte Einheit der Lufttemperaturmessung ist zusammen mit dem Windgeber auf einer Metallstange an der südlichen Gebäudekante montiert (Abb. 3.12), um Störeinflüsse des Gebäudes zu minimieren.



Abb. 3.10: Pyranometer CM11
(Bildquelle: Solartechnik Dr. Ackermann)



Abb. 3.11: Temperatursensor und Schutzgehäuse
(Bildquelle: Fa. Thies Datenblatt „Ventilierter Lufttemperaturgeber“)



Abb. 3.12: Umgebungstemperaturmessung und Windsensoren
(Bildquelle: Solartechnik Dr. Ackermann)

Als Messwertgeber zur Messung der horizontalen Windgeschwindigkeit wurde ein Schalensternanemometer (Abb. 3.12 und Abb. 3.13) verwendet. Für den Messbereich 0,5 – 50 m/s liegt das analoge Ausgangssignal im Bereich 0 – 10 V. Da der Wind bei einer Photovoltaikanlage über die Modultemperatur nur einen sehr geringen Einfluss auf die Leistung hat, ist die Messgenauigkeit von $\pm 3\%$ vom Messwert oder $\pm 0,5$ m/s und eine Auflösung $< 0,1$ m/s ausreichend. Ähnliches gilt für die horizontale Windrichtung, die mit einer Windfahne ebenfalls mit analogem Ausgangssignal 0 – 10 V bestimmt wird.



Abb. 3.13: Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsgeber
(Bildquelle: Fa. Thies Datenblatt zu den Geräten)

4. Photovoltaik in der Ausbildung

Seit dem Jahre 2002 haben sich am Agrarzentrum der Universität Debrecen die erneuerbaren Energien, insbesondere für den ländlichen Raum, zu einem Forschungsschwerpunkt entwickelt. Sie genießen heute einen hohen Stellenwert in der theoretischen und praktischen Ausbildung von Studenten. Ein wichtiges Ziel des Agrarzentrums ist es diese Technologien

neben den Studenten auch anderen Interessenten zu demonstrieren. Die hier aufgebaute netzgekoppelte Photovoltaikanlage stellt dabei einen wichtigen Meilenstein dar. Für die Zukunft ist auch die Errichtung eines Windgenerators und einer thermischen Solaranlage geplant.

Aktuell wird die Anlage im Rahmen von Übungen zu Vorlesungen vorgestellt. Hier wird die Technik erklärt sowie die Aufzeichnung, Auswertung und Darstellung von Messdaten behandelt. Die weitere Planung sieht in einem Praktikum die Durchführung von Experimenten vor. Im Rahmen seiner Diplomarbeit wertet zurzeit ein Student die Messungen an der Photovoltaikanlage aus. Darüber hinaus werden zwei Doktorarbeiten auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien durchgeführt.

Sowohl die Anlagendaten als auch die gemessenen Wetterdaten werden anderen Arbeitsgruppen an der Universität Debrecen und Firmen für Solartechnik in Ungarn und Deutschland zur Nutzung zur Verfügung gestellt.

4.1 Beschreibung des Praktikumsplatz

Die endgültigen Praktikumsversuche sind derzeit noch nicht ausgearbeitet, da die Anlage erst im Frühjahr 2004 in Betrieb gehen konnte und zunächst noch praktische Erfahrungen mit der Anlage gesammelt werden müssen. Die Photovoltaikanlage und die zugehörige Messtechnik bieten jedoch ausgezeichnete Möglichkeiten die Unterschiede der eingesetzten Solarzellentypen zu demonstrieren. Hier kann sowohl auf Momentanwerte als auch auf Messdaten über einen längeren Zeitraum aus der Vergangenheit zurückgegriffen werden. Damit kann sehr gut der Einfluss verschiedener Faktoren untersucht und demonstriert werden.

Vom Sunny Boy Control werden für jeden der drei Solargeneratoren folgende Daten gespeichert (siehe auch Tabelle 3.6):

- U-DC PV-Spannung
- I-DC PV-Strom
- U-AC Netzspannung
- I-AC Netzstrom
- P-AC Einspeiseleistung
- Z-AC Netzimpedanz
- F-AC Netzfrequenz
- E-total Eingespeiste Energie
- P-solar Solarstrahlung
- T-Luft Umgebungstemperatur
- v-Wind Windgeschwindigkeit
- R-Wind Windrichtung
- T-Modul Temperatur CIS-Solarmodul

Daraus lassen sich für jeden Solargenerator verschiedene Einflüsse und Abhängigkeiten untersuchen und darstellen, wie z.B. Abhängigkeit von U-DC, I-DC, P-AC von P-solar, T-Modul, T-Luft, v-Wind. Weiterhin können folgende Wirkungsgrade zeitabhängig ausgewertet werden:

Modulwirkungsgrad : $\eta_M = \frac{P_{DC}}{P_{solar}}$

Wechselrichter – Wirkungsgrad : $\eta_{WR} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$

Gesamtwirkungsgrad : $\eta_{ges} = \frac{P_{AC}}{P_{solar}}$

An der aktuellen Anlage lassen sich sehr gut vergleichende Untersuchungen durchführen und Fragestellungen untersuchen, wie z.B.:

- Wie unterscheiden sich die verschiedenen Zellentypen in den oben genannte Zusammenhänge bei unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen?
- Sind amorphe Module bei niedriger Einstrahlung besser als kristalline?
- Welchen Einfluss hat die Modultemperatur auf die Leistung bei den verschiedenen Solarzellen?
- Wie reagieren die Solargeneratoren bei Teilabschattungen z.B. durch Bäume, Gebäude, oder gegenseitige Verschattung der Reihen morgens oder abends zu verschiedenen Jahreszeiten?
- Wie reagieren die Solargeneratoren bei Verschattung einzelner Solarzellen oder von ganzen Modulen? Dieses Experiment ist am günstigsten an den kristallinen Modulen durchzuführen – z.B. Verschattung einer Zelle, einer Zellenreihe in Längsrichtung, einer Reihe quer, eines ganzen Moduls, mehrerer Module, etc.
- Anstatt des automatischen MPP-Trackings kann man am Sunny Boy Control auch feste DC-Spannungen einstellen. Auf diese Weise kann man sogar näherungsweise eine Kennlinie durchfahren.

Weiterhin ist ein Ausbau der Experimentiermöglichkeiten mit einzelnen separaten Modulen vorgesehen.

Im landwirtschaftlichen Bereich ist nicht nur der Einsatz einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage interessant sondern insbesondere auch der Aufbau von Inselsystemen. Als Beispiele seien hier genannt: Die Bewässerung mit PV-Pumpsystemen oder Fischteichbelüftung etc. Mit der installierten netzgekoppelten Anlage können dazu Erfahrungen gesammelt werden, die den Einstieg in die komplexere Technik von Inselsystemen erleichtern.

4.2 Ökologische und ökonomische Aspekte

Die installierte Photovoltaikanlage dient maßgeblich der Demonstration und der Weiterbildung und spielt somit eine wichtige Rolle die Verbreitung der erneuenden Energiequellen. Damit soll bei den Mitarbeitern und Studenten der Universität Debrecen aber auch bei Besuchern Bewusstseinsbildung für umweltschonende Techniken erfolgen.

Durch die detaillierte Vermessung der Anlage liegen belastbare Messdaten vor, mit denen die CO₂-Einsparung und den vermiedenen Ausstoß anderer Schadstoffen errechnet werden kann. Damit können genaue Schadstoffbilanzen erstellt werden und ökologische Untersuchungen experimentell untermauert werden. Derartige Studien tragen zur Schärfung des Umweltbewusstseins bei.

Da es in Ungarn derzeit keine kostendeckende Einspeisevergütung gibt, stehen aktuell die wirtschaftlichen Aspekte noch nicht im Vordergrund. Die gewonnenen Leistungsdaten werden aber Grundlage sein für Studien zur Wirtschaftlichkeit. Dies ist insbesondere wichtig, um in Ungarn neue Anwendungsfelder für photovoltaische Stromversorgungen wie z.B. Insel-Anlagen in der Landwirtschaft zu eröffnen. Deren Wirtschaftlichkeit ist je nach Anwendung heute schon gegeben.

5. Aufbau und Betrieb der Anlage

5.1 Aufbau der Anlage

Im April 2004 erfolgte die Montage der Gestelle und der elektrische Anschluss der Module. In der Testphase im Mai fielen zwei Wechselrichter aus, die im Rahmen der Gewährleistung ausgetauscht wurden. Als Ursache für den Ausfall wurden Spannungsspitzen im Niederspannungsnetz der Universität identifiziert. Um weitere Schäden zu vermeiden, wurden Sicherheitseinrichtungen gegen Überspannung auf der Netzseite eingebaut. Diese Probleme traten seitdem nicht mehr auf.

Im Sommer wurde bei zwei Dunasolar-Modulen Glasbruch der rückseitigen Scheibe festgestellt. Die erste Vermutung, dass es sich um einen Montagefehler am Gestell handelt, wurde nicht bestätigt. Das Nachmessen der Gestelle ergab, dass sie korrekt gebaut und installiert sind. Daher wird angenommen, dass es sich um Verspannungen im Modul selbst handelt. Im Rahmen der Gewährleistung wurde deshalb vom Lieferanten Ersatz eingefordert und Austausch zugesichert.

Anfänglich traten Probleme mit der Kommunikation zwischen Sunny Boy Control und dem PC auf. Deshalb konnten keine Messdaten übertragen und gespeichert werden. Mit Unterstützung durch Herrn Dr. Ackermann von der Firma Solartechnik Ackermann, der hierfür eigens nach Ungarn gefahren ist, wurde eine defekte Datenleitung als Fehlerquelle identifiziert. Nach der Reparatur konnte die Kommunikationssoftware korrekt installiert werden. Seit Anfang September funktioniert der Datentransfer ohne Probleme.

5.2 Messergebnisse

Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit der Datenübertragung zum PC läuft die Datenerfassung seit dem 01. September 2004 mit nur kurzen Ausfällen sehr gut. Es werden die in Tabelle 3.6 aufgeführten elektrischen Größen erfasst und als ¼-Stundenmittelwerte gespeichert. Bis September 2004 erfolgte die Strahlungsmessung noch horizontal, ab 1. Oktober wurde das Pyranometer in Modulebene aufgestellt.

Für die nachfolgende Bewertung wurden Daten vom September 2004 herangezogen. Zur Auswertung musste die Strahlung auf Modulebene umgerechnet werden.

Die erste Hälfte des Monats September hatte, wie aus Abb. 5.1 zu entnehmen ist, vorwiegend warmes und sonniges Wetter. Insbesondere in der ersten Woche gab es hervorragende Strahlungstage nahezu ohne Wolken, die Umgebungstemperatur stieg an einzelnen Tagen auf Werte über 27 °C, die Tagesmittelwerte lagen bei 22 °C. In der zweiten Monatshälfte war es häufig bewölkt und wurde merklich kühler. Die Windgeschwindigkeit lag meist zwischen 1 – 2 m/s.

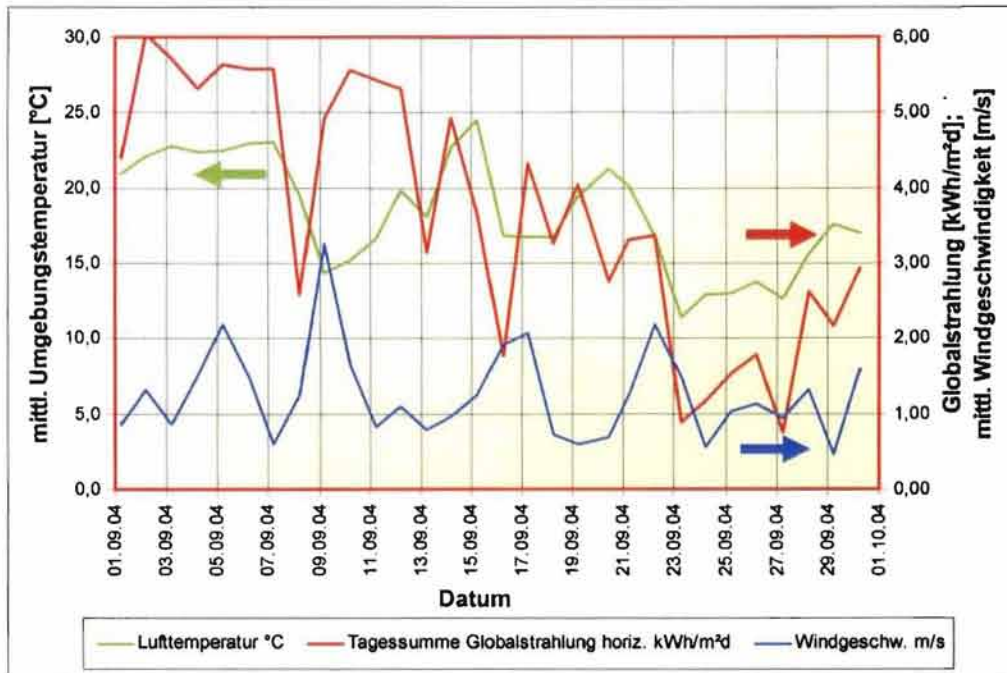


Abb. 5.1: Wetterdaten September 2004 (Tagesmittelwerte, bzw. Tagessummen)

Ein Beispiel für einen sehr schönen Tag ist der 02. September 2004. In Abb. 5.2 ist der zeitliche Verlauf der Messwerte über den Tag zu sehen. Der 24. September 2004 (siehe Abb. 5.3) ist ein Beispiel für die kühlen und bewölkten Tage der zweiten Septemberhälfte.

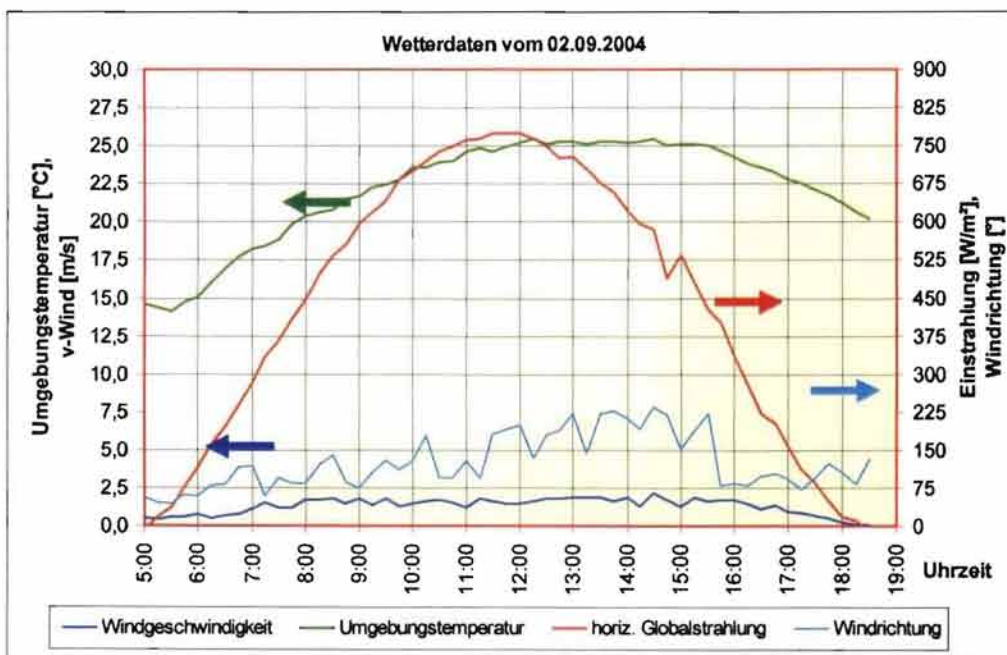


Abb. 5.2: Tagesverlauf der Wetterdaten vom 07. September 2004 (1/4-Stundenmittelwerte)

Die Abb. 5.4 zeigt als Monatsübersicht die Tagessummen der Globalstrahlung auf eine Horizontalfläche, die mittlere in das Netz eingespeiste Leistung und die täglich eingespeiste Energie (beide Werte auf der AC-Seite gemessen).

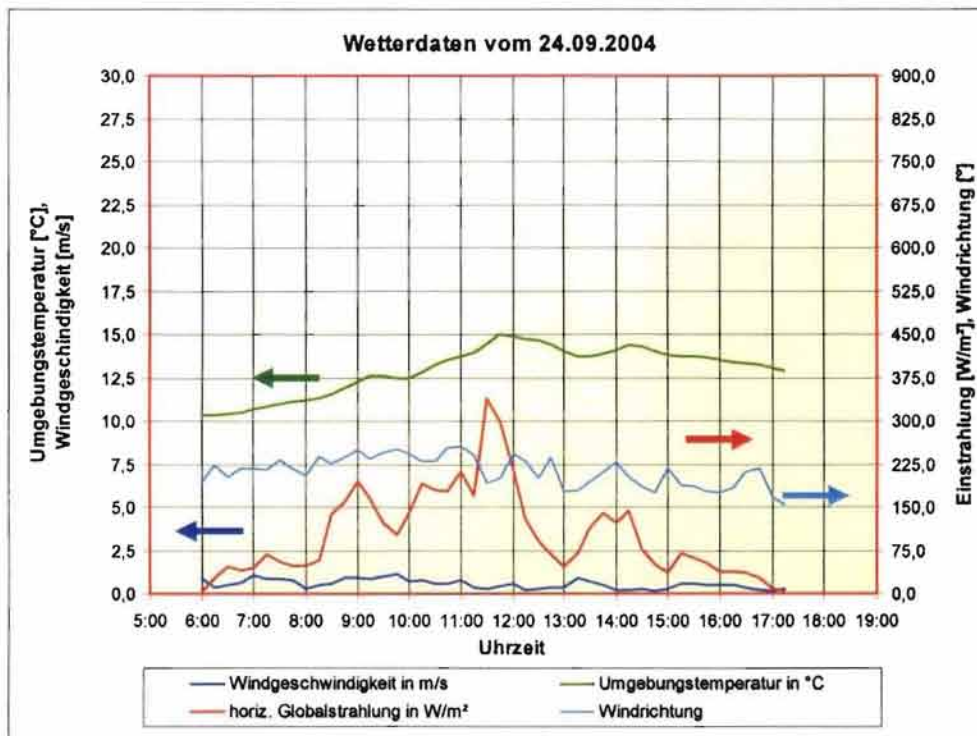


Abb. 5.3: Tagesverlauf der Wetterdaten vom 24. September 2004 (1/4-Stundenmittelwerte)

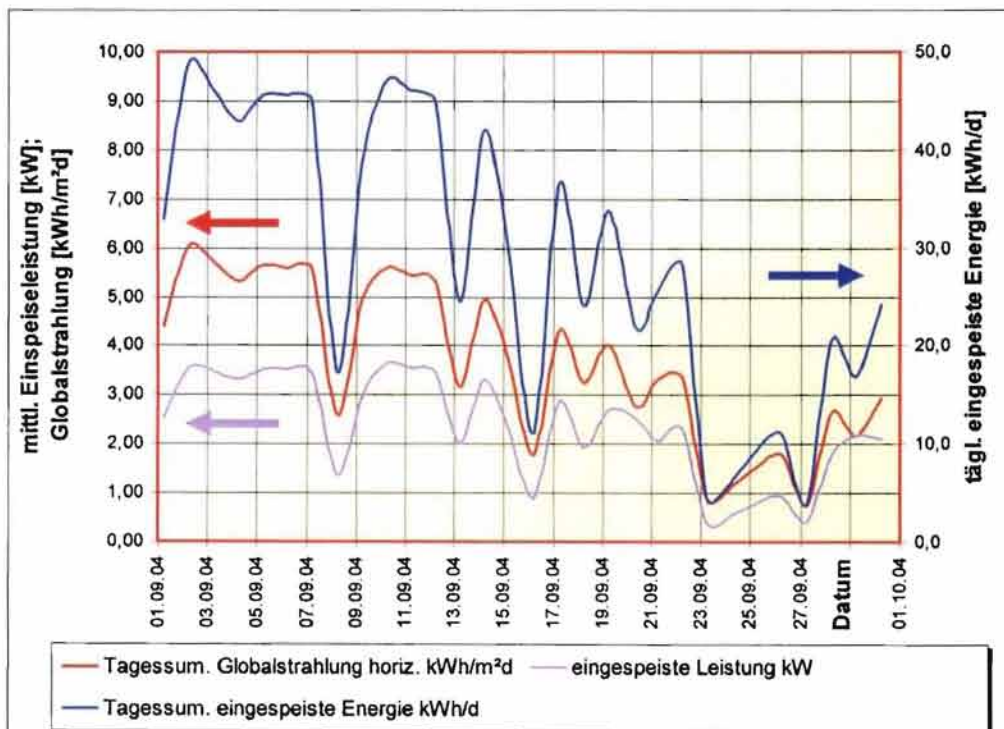


Abb. 5.4: Energielieferung der gesamten PV-Anlage, Monatsübersicht September 2004

Unter sehr guten Strahlungsbedingungen, wie beispielsweise am 02.09.2004 vorlagen, erreichten die polykristallinen Kyocera-Module (Abb. 5.5) in der Spitze eine DC-Leistung von 2475 W ($\frac{1}{4}$ -Stunden-Mittelwert). Im gleichen Zeitintervall wurde an den CIS-Solarmodulen (Abb. 5.6) eine Spitzenleistung von über 2650 W gemessen, während die a-Si Module (Abb. 5.7) von Dunasolar nur 2003 W erreichten.

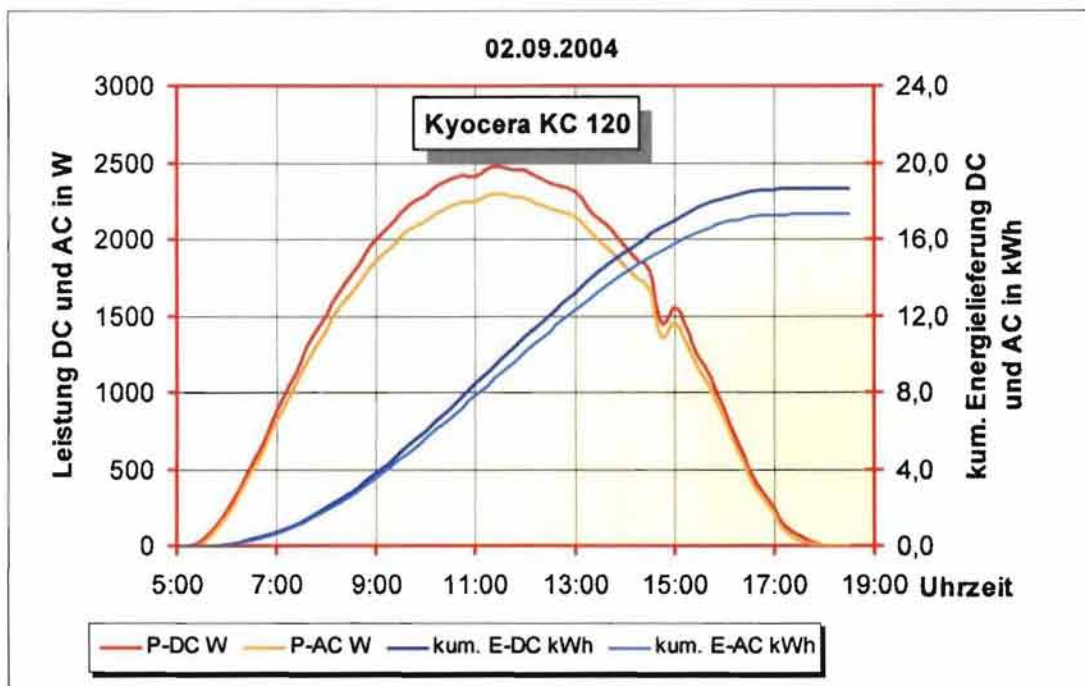


Abb. 5.5: Tagesverlauf der Leistung der Kyocera-Module am 02.09.2004

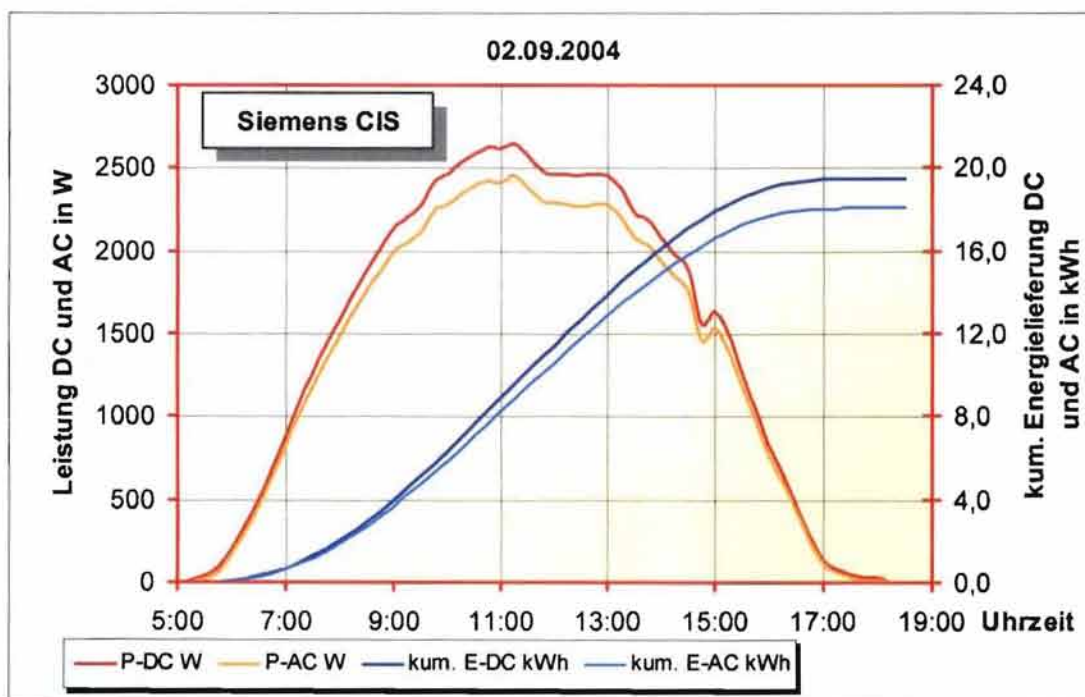


Abb. 5.6: Tagesverlauf der Leistung der CIS-Module am 02.09.2004

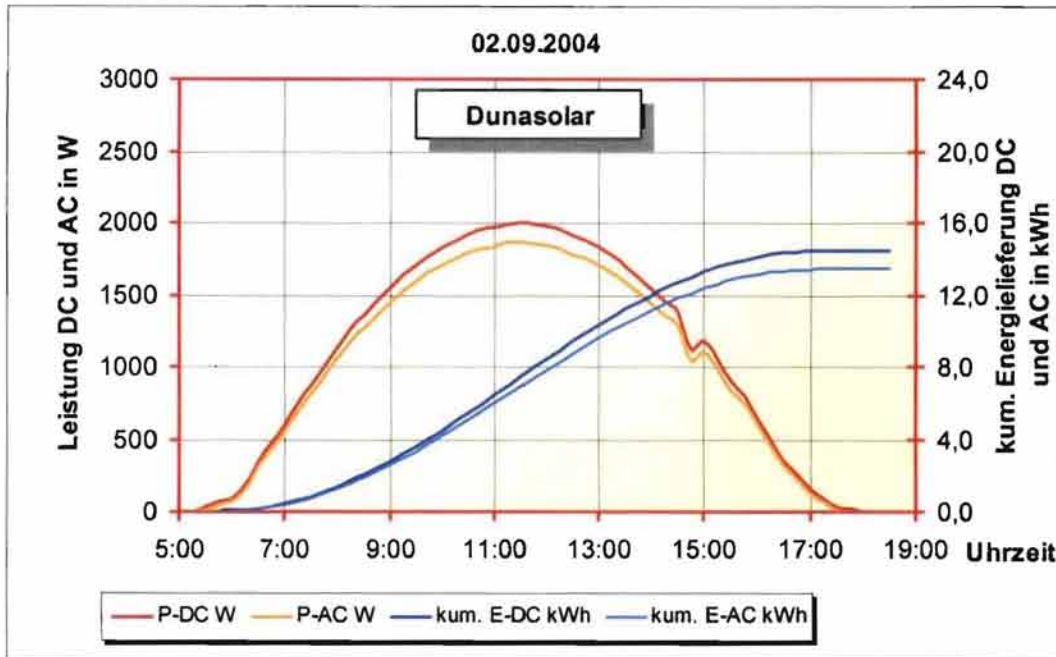


Abb. 5.7: Tagesverlauf der Leistung der Dunasolar-Module am 02.09.2004

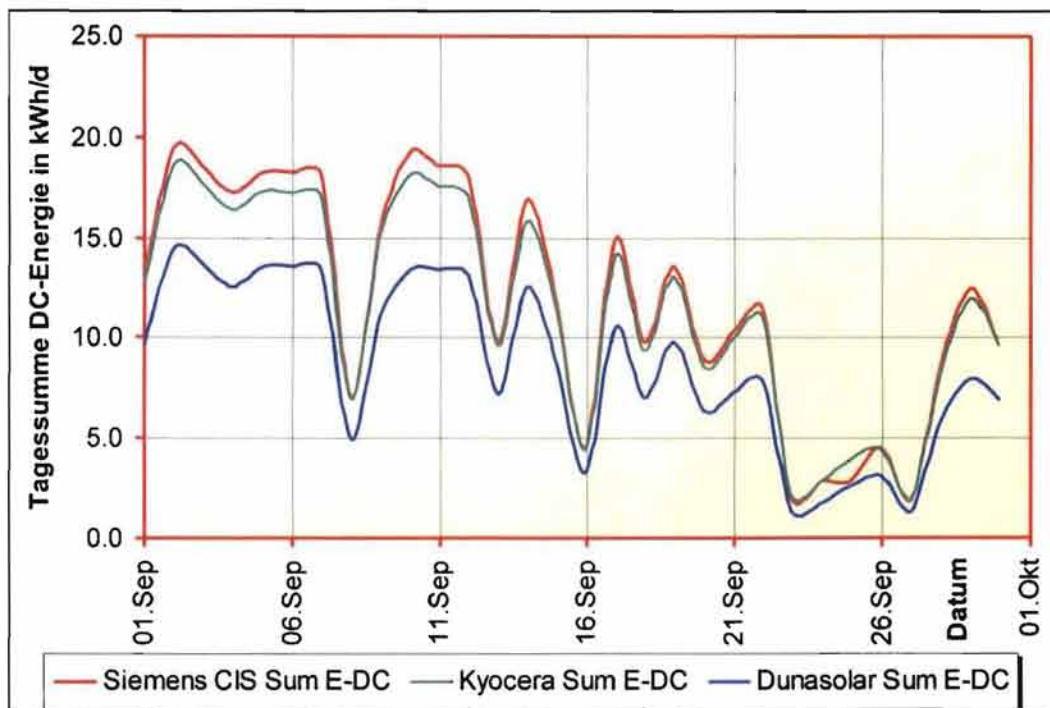


Abb. 5.8: Energielieferung der drei Solargeneratoren, Monatübersicht für den September 2004

Wie bereits beschrieben habe alle drei Solargeneratoren die gleiche Spitzenleistung unter Standardbedingungen, dennoch zeigen sich bei gleichen Aufstellungsbedingungen und nahezu gleichen täglichen Betriebszeiten deutliche Unterschiede im Tagesertrag. In Abb. 5.8 ist

der Tagesertrag jeweils der ganzen Solargeneratoren unter sonst gleichen Betriebsbedingungen über der Zeitachse aufgetragen. Die polykristallinen Module von Kyocera liegen in diesem Monat im Ertrag immer etwa 4 % unter den CIS-Solarmodulen von Siemens, während die amorphen Si-Module von Dunasolar einen um fast 30 % schlechteren Ertrag liefern als die CIS-Module. Dieser Trend wird sich bei den amorphen Si-Modulen vermutlich noch eine gewisse Zeit fortsetzen, da sie einem Alterungsprozess unterliegen.

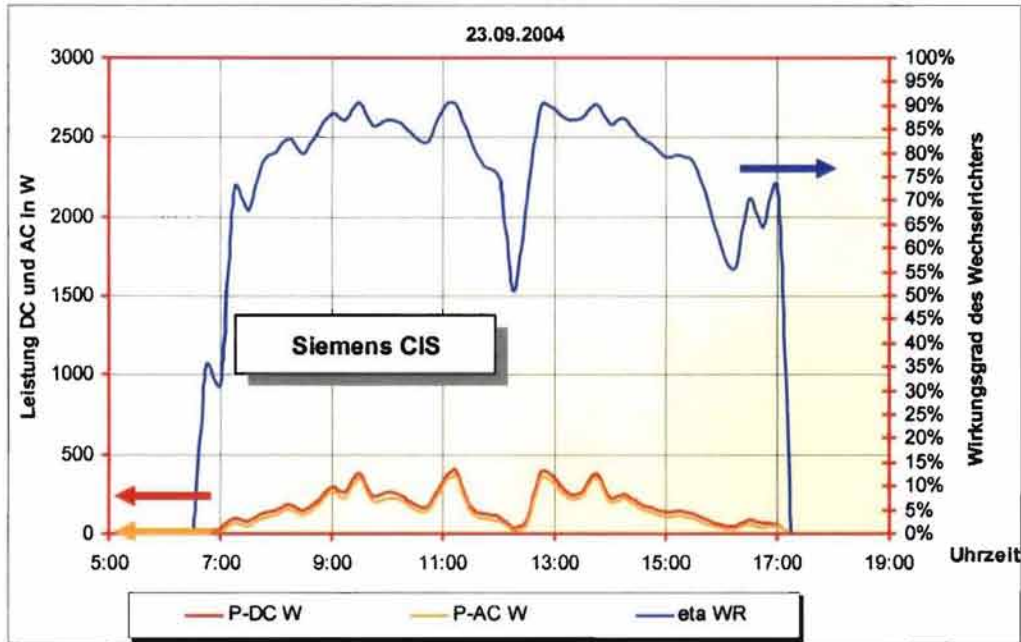


Abb. 5.9: DC- und AC-Leistung des Solargenerators (Siemens CIS-Solarzellen) und Wechselrichter-Wirkungsgrad

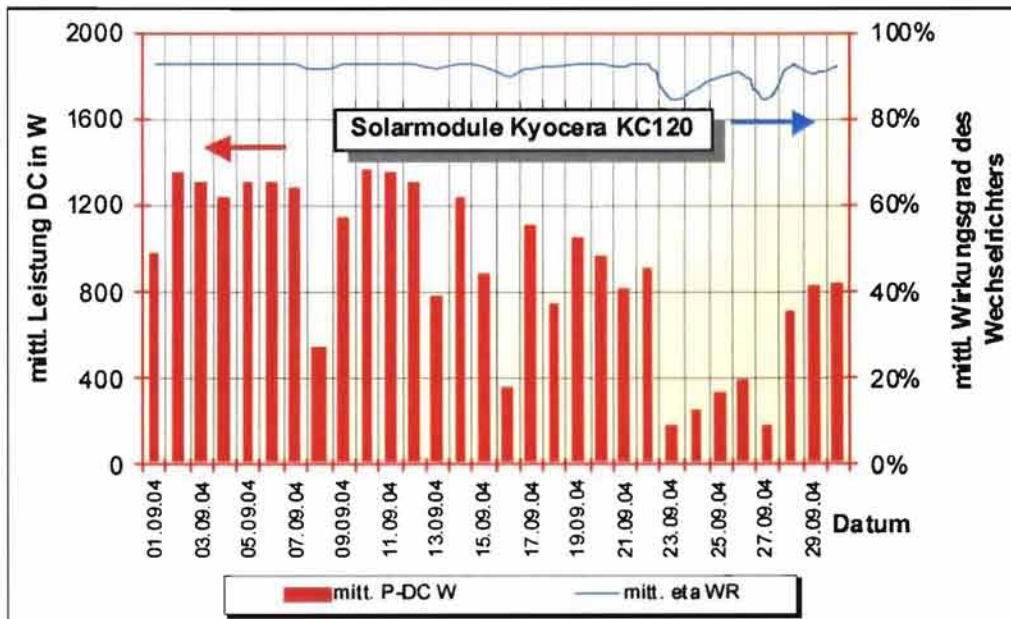


Abb. 5.10: Monatübersicht über die mittlere DC-Leistung des Solargenerators mit den Kyocera-Modulen und den mittleren Tageswirkungsgrad des Wechselrichters für den September 2004

Die eingesetzten Wechselrichter weisen über den gesamten Messzeitraum einen sehr guten Wirkungsgrad von über 93 % auf, dabei sind alle drei Geräte absolut gleichwertig. Aus den Messungen kann zudem ein sehr gutes Teillastverhalten abgeleitet werden. Der Wirkungsgrad des Wechselrichters sinkt erst unter 5 % Volllast merklich ab. Dies wird besonders deutlich, wenn man eine Tag mit schlechter Einstrahlung wie den 23.09.2004 (siehe Abb. 5.9) betrachtet. Die meiste Zeit lag die Generatorleistung erheblich unter 10 % der Spitzenleistung, der Wirkungsgrad des Wechselrichters lag meist über 80 %. Unterhalb 5 % Volllast sinkt der Wirkungsgrad unter 80 %.

Betrachtet man Tagesbilanzen über längere Zeiträume wie z.B. den ganzen Monat September (Abb. 5.10) und bestimmt einen Tageswirkungsgrad als Quotienten aus der ins Netz eingespeisten AC-Energie und der an den Wechselrichter gelieferten DC-Energie so liegt dieser Wirkungsgrad nahezu den ganzen Monat über 90 % außer in der Schlechtwetterperiode Ende September.

Für eine vergleichende Beurteilung der Solargeneratoren mit verschiedenen Zellentypen können momentane Wirkungsgrade berechnet aus den gemessenen Leistungen nach $\eta_M = P_{DC} / P_{solar}$ und Tageswirkungsgrade ermittelt aus Tagessummen nach $\bar{\eta}_M = E_{DC} / E_{solar}$ herangezogen werden. In beiden Fällen wird die solare Einstrahlung in Modulebene benötigt. Hierfür wurde die gemessene horizontale Globalstrahlung mit dem Strahlungsprozessor des Simulationsprogramms TRNSYS auf die Modulebene (30° nach Süden geneigt) umgerechnet.

In den Abb. 5.11, Abb. 5.12 und Abb. 5.13 sind die Tageswirkungsgrade $\bar{\eta}_M$ der drei Solargeneratoren und der jeweilige Gesamtwirkungsgrad der Anlage, der die Wechselrichterverluste noch mit berücksichtigt, aufgetragen.

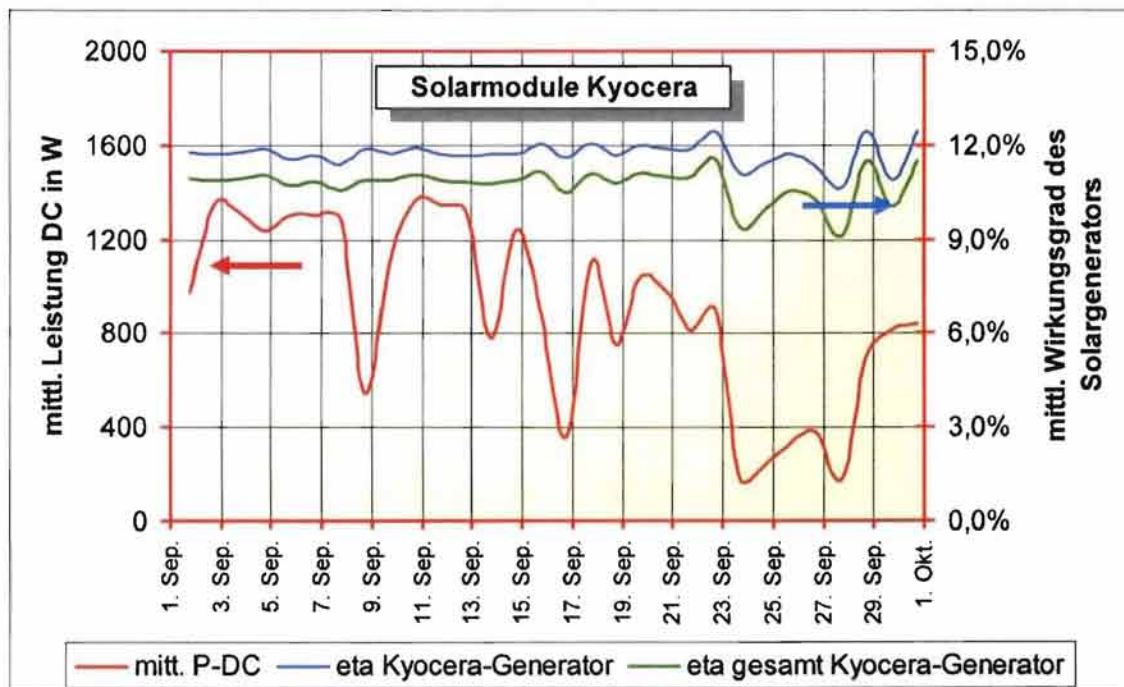


Abb. 5.11: DC-Leistung des Solargenerators (Kyocera), Modul- und Gesamtwirkungsgrad

Die Kyocera-Module mit den polykristallinen Siliziumzellen erreichen, wie erwartet, mit über 12 % die höchsten Wirkungsgrade. An schönen Tagen wurden einzelne Momentanwerte von fast 14 % ermittelt. Dieser Zellentyp reagiert auch relativ unempfindlich auf schlechtes Wetter

mit vorwiegend diffuser Einstrahlung, wie es im Zeitraum zwischen 22.09. und 28.09. herrschte.

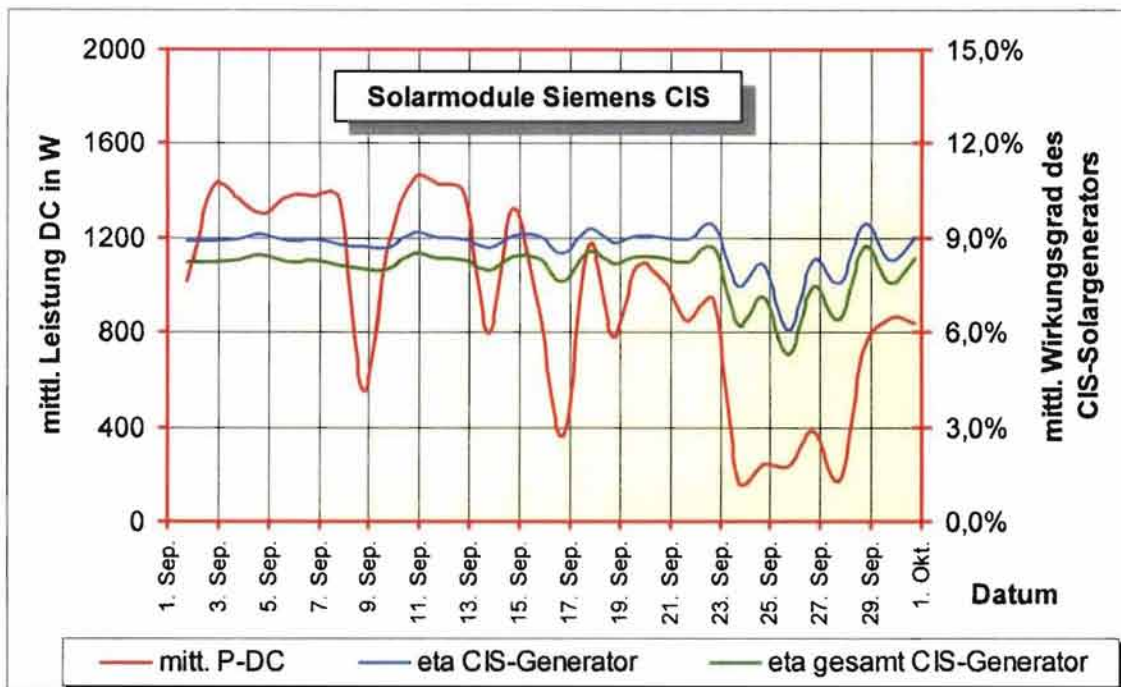


Abb. 5.12: DC-Leistung des Solargenerators (CIS-Solarzellen), Modul- und Gesamtwirkungsgrad

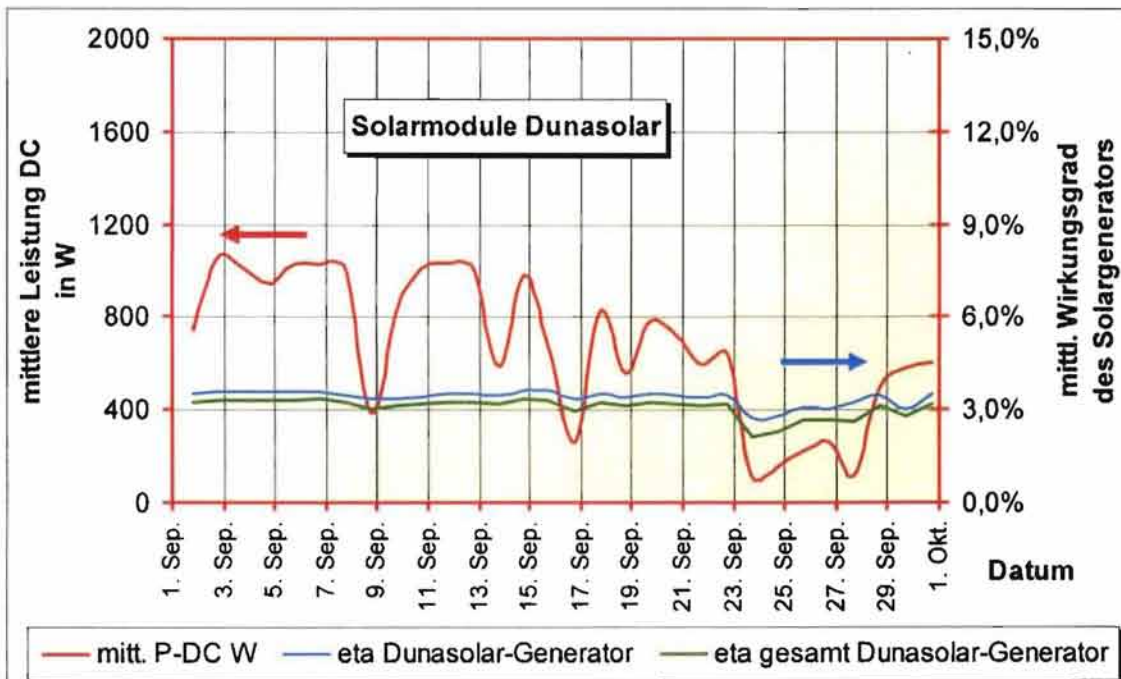


Abb. 5.13: DC-Leistung des Solargenerators (Dunasolar), Modul- und Gesamtwirkungsgrad

Der Tageswirkungsgrad der CIS-Module ist mit etwa 9 % deutlich niedriger und zeigt zudem eine gewisse Abhängigkeit von den Einstrahlungsbedingungen. An besonders schönen Ta-

gen wurden beim Wirkungsgrad Momentanwerte knapp über 10 % gemessen. In der Schlechtwetterperiode zwischen 22.09. und 28.09. sinkt der Tageswirkungsgrad sogar etwas stärker ab als bei den polykristallinen Modulen.

Die Dunasolar-Module aus amorphem Silizium haben mit etwas über 3 % den niedrigsten Wirkungsgrad. Hier fällt die Abhängigkeit des Wirkungsgrades bei niedrigen Einstrahlungen und geringer aus als bei den beiden anderen Zellentypen.

Beispielhaft für die in Kapitel 4.1 aufgeführten Detailanalysen soll hier kurz auf messtechnische die Verifizierung der Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades eingegangen werden. Auf der Rückseite eines CIS-Solarmoduls wurde ein Pt100-Fühler angebracht. Die dort gemessene Modultemperatur ist ein Maß für die der Solarzellen. In Abb. 5.14 ist der zeitliche Verlauf der Modultemperatur und der Wirkungsgrad eingezeichnet. Um 7:30 Uhr beträgt der Wirkungsgrad 10,1 % bei einer Modultemperatur 28 °C. Im Laufe des Vormittags bis etwa 11:00 Uhr steigt die Modultemperatur auf 50 °C und der Wirkungsgrad sinkt um 1,1 %-Punkte auf 9,0 % ab. Man kann diese Abnahme des Wirkungsgrades auch theoretisch abschätzen. Der Temperaturkoeffizient für MPP-Betrieb ist $\alpha_{MPP} = -0,6 \text{ \%}/\text{K}$. Bei einer Erhöhung der Zellentemperatur um 22 K bedeutet dies eine Wirkungsgradabnahme um 1,3 %-Punkte. Bereits diese einfache Abschätzung zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Messung, wenn man berücksichtigt, dass sich die Betriebsbedingungen im Laufe des Betrachtungszeitraums verändert haben.

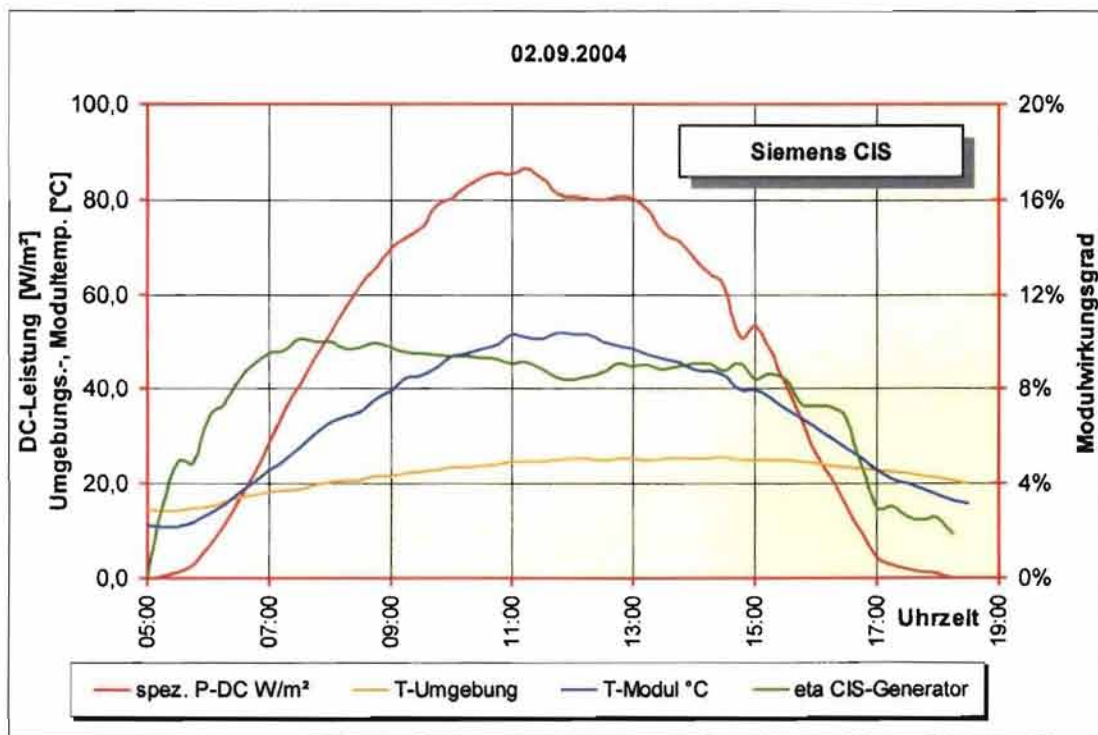


Abb. 5.14: Zeitverlauf Modulwirkungsgrad, Umgebungs- und Modultemperatur

Die Leistungsunterschiede der Solargeneratoren mit den verschiedenen Solarzellentypen lassen sich, wie die Auswertung der Messdaten gezeigt hat, mit der Anlage und der eingesetzten Messtechnik sehr gut demonstrieren. Aus den Daten können Energiebilanzen erstellt und die Wirkungsgrade von Einzelkomponenten bestimmt werden. Zudem ist es möglich auch Detailuntersuchungen wie z.B. die Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades durchzuführen.

6. Zusammenfassung

Seit der politischen Wende im Jahr 1989 sind in Ungarn bei der Bevölkerung das Umweltbewusstsein und das Interesse an erneuerbaren Energien stark angestiegen. Dem muss auch in der Ausbildung insbesondere an den Universitäten Rechnung getragen werden.

Der in diesem Projekt an der Universität Debrecen errichteten Photovoltaik-Anlage kommt eine wichtige Rolle als Forschungs- und Demonstrationsanlage zu. Durch den Einsatz von drei verschiedenen Typen von Solarzellen können so unter gleichen Witterungs- und Betriebsbedingungen praktische Erfahrungen gesammelt werden. Der Standort Debrecen bietet zudem klimatische Vorteile wie z.B. eine hohe solare Einstrahlung.

Die Projektabwicklung gestaltete sich besonders schwierig, da mit der Zusammenlegung verschiedener Universitäten und Fachhochschulen in Debrecen neue Organisationsstrukturen geschaffen wurden und sich Ungarn durch den Beitritt zur Europäischen Union in einer wirtschaftlichen Umbruchphase befindet. Dies war auch Hintergrund der Ablehnung des Förderantrags durch das ungarische Wirtschaftsministerium. Diverse Ausfälle von ungarischen Sponsoren mussten durch Erhöhung der Eigenbeteiligung der Universität Debrecen und des ZAE Bayern ausgeglichen werden. Diese organisatorischen Probleme waren die Hauptursache für die zeitliche Verzögerung im Projektablauf.

Die Zuständigkeit für das Projekt wurde dem Lehrstuhl für Agrartechnik übertragen. Deshalb ist die Photovoltaikanlage auf dem Flachdach einer Maschinenhalle des Lehrstuhls für Landtechnik installiert. Im Gebäude selbst ist die übrige System- und Messtechnik untergebracht.

Die Gesamtanlage ist in drei unabhängige Teilanlagen gleicher Spitzenleistung (je 2,88 W_p) mit unterschiedlichen Typen von Solarzellen unterteilt. Es kamen Module mit polykristallinen Siliziumzellen von Kyocera, mit CIS Dünnschichtzellen von Siemens und mit amorphen Siliziumzellen von Dunasolar zum Einsatz. Auf diese Weise wird der Demonstrations- und Forschungscharakter dieser Anlage besonders hervorgehoben.

Jede der drei Teilanlagen ist mit einem eigenen String-Wechselrichter ausgerüstet und kann so unabhängig von den anderen betrieben werden. Die Wechselrichter ihrerseits werden über eine intelligente Messdatenerfassungs- und Diagnoseeinheit den Sunny Boy Control Plus angesteuert, mit dem die für Regelaufgaben in den Wechselrichtern erfassten Messwerte ausgelesen und auf einem PC abgespeichert werden. Diese Messdaten werden zusammen mit zusätzlich erfassten Wetterdaten auf dem Rechner ausgewertet und graphisch dargestellt. Die Messdaten lassen verschiedene Detailuntersuchungen wie z.B. die Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades zu.

Wegen der Instrumentierung kann die Anlage hervorragend in der universitären Ausbildung eingesetzt werden. Im Technikraum, in dem sich die Wechselrichter und die Datenerfassung befinden, wurde ein Praktikumsplatz eingerichtet, an dem die Studenten eigene Experimente durchführen und vorliegenden Messdaten unter verschiedenen Aspekten auswerten können.

Zur Information einer breiteren Öffentlichkeit wird eine Visualisierung der Daten mit Großdisplays und Schautafeln im Zentralgebäude der Universität erfolgen.

Nach Inbetriebnahme der Anlage traten zwar Betriebsstörungen an zwei Wechselrichtern auf, die durch Überspannungen im Universitätsnetz verursacht wurden. Beide Geräte wurden im Rahmen der Gewährleistung ausgetauscht.

Seit September 2004 läuft der eigentliche Messbetrieb ohne Probleme. Die Datenauswertung zeigte bereits deutliche Leistungs- und Ertragsunterschiede bei den verschiedenen Solarzellentypen. Die polykristallinen Kyocera-Module wiesen erwartungsgemäß den höchsten

Wirkungsgrad auf. Der Energieertrag der CIS-Module war bei gleicher Peakleistung geringfügig besser als der der Kyocera-Module, während die amorphen Si-Module von Dunasolar fast 30 % schlechter waren. Dies ist auf unterschiedlichen Einfluss der Betriebsbedingungen zurückzuführen.

Insgesamt bietet diese Photovoltaikanlage an der Universität Debrecen mit der eingesetzten Messtechnik hervorragende Möglichkeiten, um durch Experimentieren eigene Erfahrungen zu sammeln und die Ausbildung von Studenten praxisnah zu gestalten.

Danksagung

Dieses Projekt wurde nur durch die großzügige Unterstützung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), durch den Solarenergieförderverein e.V. München, die Fa. Solartechnik Ackermann aus Heimhausen, E.On Hungaria AG und der Transelektro AG möglich. Die Autoren bedanken sich bei allen Sponsoren für die Förderung.

7. Anhang

7.1 Literaturverzeichnis

- /Lit. 1/ Donauer Solartechnik, Datenblatt db_kyocera_kc120
- /Lit. 2/ Siemens Solar GmbH, Datenblatt zum „Solar Module ST40“, Order No. 021345, Rev. A, 02/1999 Siemens Solar, München.
- /Lit. 3/ Dunasolar Inc., Datenblatt a-Si PV Modul DS40, 01/2003 Dunasolar, Budapest
- /Lit. 4/ Sunny Boy 2500 String-Wechselrichter für Photovoltaikanlagen, Technische Beschreibung Ausgabe 1.2, SB2500-11:ED4801, SMA Regelsysteme GmbH, Niestetal 2001
- /Lit. 5/ Bedienungsanleitung für die intelligente Datenerfassung Sunny Boy Control Plus, Ausgabe 2.2, SUNBC-12-ND3400, SMA Regelsysteme GmbH, Niestetal 2000

7.2 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2.1: Monatsmittel der Umgebungstemperatur für Debrecen und München (Datenquelle: Meteororm Vers. 4.0)4
- Abb. 2.2: Strahlungssumme der horizontalen Globalstrahlung für Debrecen und München (Datenquelle: Meteororm Vers. 4.0)5
- Abb. 2.3: Monatswerte der Sonnenscheinstunden für Debrecen und München (Datenquelle: Meteororm Vers. 4.0)5
- Abb. 3.1: Schaltplan zur Photovoltaikanlage an der Universität Debrecen (Bildquelle: Solartechnik Dr. Ackermann).....7

Abb. 3.2:	Schnittzeichnung des Gestells für die Solarmodule (Bildquelle: Universität Debrecen).....	8
Abb. 3.3:	Traggestelle für die Solarmodule (Bildquelle: Universität Debrecen)	9
Abb. 3.4:	Foto der Reihe polykristalliner Solarmodule Kyocera KC120 (Bildquelle: Universität Debrecen).....	10
Abb. 3.5:	Foto der Reihe CIS-Solarmodule Siemens ST40 (Bildquelle: Universität Debrecen).....	11
Abb. 3.6:	Foto einer Reihe a-Si-Solarmodule Dunasolar DS40 (Bildquelle: Universität Debrecen).....	12
Abb. 3.7:	Blockschaltbild des Wechselrichters Sunny Boy SB2500 (Bildquelle: /Lit. 4/)	14
Abb. 3.8:	Prinzip der Datenübertragung von den Wechselrichtern an den Sunny Boy Control und weiter an den PC (Bildquelle: /Lit. 5/)	15
Abb. 3.9:	Technikraum mit Wechselrichter (Bildquelle: Universität Debrecen)	17
Abb. 3.10:	Pyranometer CM11 (Bildquelle: Solartechnik Dr. Ackermann)	18
Abb. 3.11:	Temperatursensor und Schutzgehäuse (Bildquelle: Fa. Thies Datenblatt „Ventilierter Lufttemperaturgeber“)	18
Abb. 3.12:	Umgebungstemperaturmessung und Windsensoren (Bildquelle: Solartechnik Dr. Ackermann)	19
Abb. 3.13:	Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsgeber (Bildquelle: Fa. Thies Datenblatt zu den Geräten)	19
Abb. 5.1:	Wetterdaten September 2004 (Tagesmittelwerte, bzw. Tagessummen)	23
Abb. 5.2:	Tagesverlauf der Wetterdaten vom 07. September 2004 (1/4-Stundenmittelwerte)	23
Abb. 5.3:	Tagesverlauf der Wetterdaten vom 24. September 2004 (1/4-Stundenmittelwerte)	24
Abb. 5.4:	Energielieferung der gesamten PV-Anlage, Monatübersicht September 2004	24
Abb. 5.5:	Tagesverlauf der Leistung der Kyocera-Module am 02.09.2004	25
Abb. 5.6:	Tagesverlauf der Leistung der CIS-Module am 02.09.2004	25
Abb. 5.7:	Tagesverlauf der Leistung der Dunasolar-Module am 02.09.2004	26
Abb. 5.8:	Energielieferung der drei Solargeneratoren, Monatübersicht für den September 2004	26
Abb. 5.9:	DC- und AC-Leistung des Solargenerators (Siemens CIS-Solarzellen) und Wechselrichter-Wirkungsgrad	27
Abb. 5.10:	Monatübersicht über die mittlere DC-Leistung des Solargenerators mit den Kyocera-Modulen und den mittleren Tageswirkungsgrad des Wechselrichters für den September 2004	27
Abb. 5.11:	DC-Leistung des Solargenerators (Kyocera), Modul- und Gesamtwirkungsgrad	28
Abb. 5.12:	DC-Leistung des Solargenerators (CIS-Solarzellen), Modul- und Gesamtwirkungsgrad	29
Abb. 5.13:	DC-Leistung des Solargenerators (Dunasolar), Modul- und Gesamtwirkungsgrad	29
Abb. 5.14:	Zeitverlauf Modulwirkungsgrad, Umgebungs- und Modultemperatur	30

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Verschaltung der Solarmodule.....	6
Tabelle 3.2:	Technische Daten der polykristallinen Kyocera KC 120 Module	10
Tabelle 3.3:	Technische Daten der CIS-Module Siemens ST40	11
Tabelle 3.4:	Technische Daten der amorphen Solarmodule DS40 von Dunasolar	12
Tabelle 3.5:	Technische Daten des eingesetzten Wechselrichters SB2500.....	13
Tabelle 3.6:	Übersicht der elektrischen Messkanäle der drei Solargeneratoren	16
Tabelle 3.7:	Technische Spezifikationen des Pyranometers CM11.....	17