

Forschungsprogramm Fotovoltaik



EF-Archiv 194243

HELIOFOL II-Sonnenkollektorsystem mit flächiger Strahlungsverdichtung

Bau eines fotovoltaischen HELIOFOL II - Solarkraftwerks
Teil 1: Systementwurfs- und Planungsphase

Bearbeitet von

Kurt Stegmüller, dipl.Ing.HTL und Thyl Steinemann, Projektleiter
KOSMO SYNERGIE AG

Wylersstr.121, 3014 Bern / Rotbuechstr.6, 8165 Wasen (Schleinikon)

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Stellungnahme des Bundesamtes für Energiewirtschaft zum Schlussbericht des Projektes "Heliofol II" der Firma Kosmo Synergie AG

Photovoltaikkonzepte, welche die anfallende Direktstrahlung der Sonne durch ein optisches System auf eine kleine Solarzellenfläche konzentrieren, werden seit geraumer Zeit diskutiert. Im solarthermischen Bereich wurde dieses Prinzip bereits demonstriert. Photovoltaikkonzentrator-konzepte erlauben aufgrund der hohen Einstrahlungsintensität einen höheren Wirkungsgrad der Solarzellen und einen kleineren Solarzellen-Flächenbedarf. Dadurch entsteht ein Kostenreduktionspotential. Systeme dieser Art bedingen jedoch einen hohen Anteil von Direktstrahlung, müssen der Sonne nachgeführt werden und erfordern einen entsprechenden Unterhalt. Diese Anforderungen schränken den Einsatzbereich solcher Systeme erheblich ein. Im Zusammenhang mit Konzentrator-konzepten wird auch die Kogeneration diskutiert, bei welcher nebst der Elektrizität auch die Wärme genutzt werden kann. Dadurch kann der Gesamtwirkungsgrad der Anlage erhöht werden. Die Schwierigkeit besteht hier bei der Nutzung der anfallenden Wärme in strahlungsintensiven Gebieten.

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt die im Rahmen des Projektes Heliofol II, Systementwurfs- und Planungsphase, durchgeführten Arbeiten. Zu den in diesem Bericht gemachten Aussagen nimmt das BEW wie folgt Stellung:

Der künftige Einsatz von konzentrierenden Photovoltaikkonzepten in Mitteleuropa, insbesondere der Schweiz, ist aufgrund der Strahlungsverhältnisse (mit Ausnahme nebelfreier Gebiete), aber auch aufgrund der Siedlungsdichte, selbst bei entsprechender Wirtschaftlichkeit, fraglich. Dies stellt kein Argument gegen Konzentrator-konzepte an und für sich dar, schränkt jedoch deren Anwendung ein. Es ist andererseits durchaus möglich, dass solche Konzepte in dafür geeigneten Gebieten in Zukunft zur Anwendung gelangen werden.

Im Projekt Heliofol wurde ein neues, flächenverdichtendes Photovoltaiksystem theoretisch beschrieben und anhand eines Prototypen realisiert. Das System wurde in erster Linie theoretisch optimiert. Die Parameter des Prototypen (optischer Wirkungsgrad, Konzentration) erreichen die in den verschiedenen Studien beschriebenen optimierten Werte bei weitem nicht. Die gemachten Aussagen lassen sich deshalb durch die gemessenen Werte nicht belegen. Der Bericht unterscheidet die theoretisch optimierten Parameter nicht ausreichend von den experimentellen Resultaten.

Ähnlich verhält es sich mit weiteren im Bericht gemachten Aussagen. Es wird allgemein mit sehr optimistischen Werten (Verfügbarkeit der erforderlichen Solarzellen, Flächenbedarf, Wirtschaftlichkeit) gerechnet, welche vorläufig theoretischer Natur sind. Die Schlussfolgerungen, insbesondere die Aussage, dass nur mit einem System wie Heliofol II der wirtschaftliche Durchbruch der Photovoltaik geschafft werden kann, sind deshalb zu relativieren.

Zusammengefasst entsteht aufgrund des vorliegenden Berichtes ein sehr optimistisches Bild, welches sich weitgehend auf theoretische Studien abstützt und durch die durchgeführten Messungen nur beschränkt belegt werden kann.

24. März 1995 / BEW Sektion Energieforschung

Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden 1. Teil des Projektes für ein neuartiges Fotovoltaik-Kraftwerkssystem sollen die **grundlegenden Parameter** erarbeitet werden, welche wir für die Herstellung von HELIOFOL II - Fresnelspiegel-Strahlungsverdichtern als Energiesammler benötigen, mit dem Endziel der Konzeption, des Baues und des Betriebes von besonders effizienten und wirtschaftlichen fotovoltaischen Solarkraftwerken.

Die verschiedenen Prognosen über die Verbilligung der Solarmodule oder über die baldige Markteinführung von leistungsfähigen Billigzellen haben sich alle als viel zu optimistisch erwiesen. Auch wenn Höchstleistungs-Solarzellen ein Mehrfaches von Standard-Solarzellen kosten, lohnt sich daher unter geeigneten klimatischen Bedingungen bis auf weiteres die kompliziertere Technik der **Strahlungsverdichtung** und der **Sonnenmitführung**, wodurch die Anzahl benötigter Solarzellen effektiv um **99% (!)** reduziert werden kann. Dies beabsichtigen wir zu realisieren durch Strahlungsverdichtung mittels mehrfach flächenmässiger Überlagerung von Strahlungsbändern mit **optisch strukturierten Fresnel-Folienspiegel-Elementen**.

Als Wichtigstes konnten **Konzentratorzellen für hohe Einstrahlungsleistung** (200 bis 1500 Sonnen) beschafft und getestet werden, die auf dem Markt normalerweise nicht erhältlich sind (Bilder 6, 8). Es wurden gebaut, bzw. beschafft und eingerichtet:

- ▶ Ein **Testkollektor** mit 112 Oberflächenspiegelstreifen als Strahlungsverdichter und mit drei verschiedenen dimensionierten und Sorten von Konzentration-Solarzellen (Si und GaAs), die auf einem drehbaren Absorber montiert sind (siehe "Beschreibung der Testanlage" im Anhang; Foto: Bild 12, Zeichnung: Bild 20),
- ▶ Eine siderische **Sonnenmitführanlage** mit manueller Justierung (Bild 15), eine **elektronische Last** und eine vollständige **Messdatenerfassungs-Einrichtung** (Bild 18). Mit dieser Testanlage konnten im Labor und an der Sonne ausführliche Messungen durchgeführt werden (Bilder 15,17,18, Tabellen 1...7, Diagramme 1...10, Testprotokolle).

Es zeigte sich, dass eine hohe Sonnenmitführ-Genauigkeit mit einfachen Mitteln erreichbar ist, jedoch eine **zweiachsig** automatisch gesteuerte **Sonnenmitführung** auch für die Tests von grossem Vorteil wäre.

Bei der Auswertung der Messergebnisse stellte sich das Problem der Berechnungsmethode für einen aussagekräftigen **Systemwirkungsgrad** (Auswirkung der Spiegellage und -Neigung). Es wurden daher 2 bis 4 Berechnungsvarianten eingesetzt, um in den Zusammenfassungen und Vergleichsdiagrammen den jeweils geeignetsten Faktor verwenden zu können. Von besonderer Nützlichkeit zeigte sich ausserdem die Verwendung des **flächenspezifischen Leistungsgrades** der eingesetzten Solarzellen in Bezug auf eine Normeinstrahlung von 1000W/m^2 (entspr. 100mW/cm^2). > Der Prototyp wurde nicht auf höchsten Wirkungsgrad, sondern auf grösste Vielseitigkeit gebaut, um beste Voraussetzungen für die Systemoptimierung zu haben.

Die Erwartung, dass mit dem HELIOFOL II-Prinzip eine **sehr gleichmässige Strahlungsverdichtung** (etwa $\pm 1.5\%$ über die ganze Breite der Solarzelle) erreichbar ist, konnte bestätigt werden (Diagramm 1).

Die verfügbaren Konzentrationzellen wurden vor der Applikation sowohl am PSI Würenlingen (Bild 5; Tabelle 8 und Testprotokolle PSI) als auch mit unserer Messeinrichtung (Bild 4) einzeln ausgemessen. Die weitgehende Übereinstimmung der Ausmessungsdaten weist daraufhin, dass die Genauigkeit unserer Messeinrichtung mindestens sehr nahe am **internationalen Standard** liegt und die Daten repräsentativ sind.

Die **DYNASYSTEM AG** Bern und die **HOLOTEC AG** Luzern erarbeiteten unabhängig voneinander zwei rechnerische Studien [5], [7] über die Geometrie der Optik des HELIOFOL II-Verdichtersystems. Aus diesen Studien und aus den Messdaten geht hervor, dass der gewählte Strahlungsverdichtungsfaktor mit den ausgeführten Verdichterdimensionen infolge der Divergenz der Sonnenstrahlung relativ hohe Verluste ergibt. Durch Änderung des Verdichtungsfaktors, der Fokaldistanz und der Verdichterdimensionen werden wesentliche Verbesserungen zur Erhöhung des Wirkungsgrades auf etwa **das Doppelte** möglich sein.

Die **HTC Solar GmbH** Lörrach half uns bei der Beschaffung der Konzentrationzellen aus USA und Russland. Im weiteren erarbeitete sie im Unterauftrag eine Studie [2] zur Konzeption, Anpassung und Optimierung eines Hochleistungs-Absorbersystems und der thermischen Auskopplung im HELIOFOL II-System. Ihr Konzept für Wärmenutzung, Wärmespeicherung und Energie-Regeneration wird in der 2. Projektphase angewendet.

Ein gegenüber dem Auftrag ungelöstes Problem ist die **Verdichteroptimierung**, die aus zeitlichen Gründen nicht mehr durchgeführt werden konnte (diese Arbeit ist für die zweite Projektstufe vorgesehen). Die notwendigen Parameter für eine **Optimierung des HELIOFOL II-Systems** und insbesondere der Fresnel-Folienspiegel-Elemente stehen uns aber jetzt dank den Messresultaten und Konzeptstudien zur Verfügung. Für die zweite Projektphase 1995/97 ist der Bau einer **25 KW HELIOFOL II-Pilotkraftwerkanlage** geplant.

Abstract

Part 1 of the present project aimed at deriving the basic parameters for a new photovoltaic system for power generation. The target of the project is to design, construct and operate solar power plants with unusual efficient and economic photovoltaics.

The HELIOFOIL II system allows the reduction of the surface of solar cells by 99% (!). We intend to achieve this by radiation intensification through multiple superposition of radiation bands with optically structured Fresnel foil mirror elements.

We receipt concentrator cells for high radiations (up to 1'500 suns). We built, bought and installed a test collector (picture 12) with 112 mirror bands and with three types of concentrator solar cells (Si and GaAs), a sideric sun tracker with manual adjustment (picture 9) and a complete data gathering unit. Extensive tests were carried out with this testing arrangement, in the laboratory as well as in the sun (picture 15). We did'nt construct the prototype for highest efficiency, but for best conditions of the system optimization.

The performance of the available concentrator cells was individually tested at PSI Würenlingen (picture 5 and table 8/ZELLPSI1.XLS) and with our own test equipment (picture 4). The results corresponded to a high degree.

HTC Solar Lörrach helped us with the acquisition of the concentrator cells from the USA and from Russia. They elaborated a study for the design, modification and optimization of a high efficiency absorber system and of a thermal decoupling using HELIOFOIL II Fresnel foil mirror elements [2].

DYNASYSTEM AG Berne [5] and HOLOTEC AG Lucerne [7] elaborated two different studies on the geometry of the optical system of HELIOFOIL II concentrators.

With the evaluation of the test results we will have at our disposition the necessary parameters for the optimization of the system; this is a prerequisite for the construction of optically structured Fresnel foil mirror elements for a HELIOFOIL II pilot power plant.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	1
Abstract in English	2
Inhaltsverzeichnis	3
Ausgangslage	4
Ziel der Arbeit; Lösungsweg	5
Hauptergebnisse; noch offene Probleme	6
Die Lösung der einzelnen Teilaufgaben:	
1. Start und Projektplanung	7
2. Firmenkontakte u. weitere Abklärungen mit Deutschland, USA, Russland	7
3. Beschaffung von GaAs-Konzentrator-Solarzellen für min.75 cm ² Fläche	7
4. Ausmessen der Solarzellen und Verifizieren der Leistungsdaten	8
5. Applikation der Solarzellen auf Unterlagen und Absorber	9
6. Nachmessung der applizierten Zellen bei 1 Sonne (KOSMO SYNERGIE+PSI) ..	11
7. Standort für Testanlage auswählen.....	11
8. Optimale Konstruktion des Solar-Trackers und der Substrukturen evaluieren	11
9. Optimierung der Form des Verdichters (V-Form, Parabel, gebrochene Parabel) ..	12
10. Bau eines kleinen Prototyps HELIOFOL II/3 mit 120 Spiegeln	13
11. Montage des Prototyps HELIOFOL II/3 auf Nachführplattform	13
12. Installation der Testanlage	14
13. Messungen mit den Zellen im Prototyp HELIOFOL II/3 mit 100 Sonnen	14
14. Notwendigkeit der Kühlung der Solarzellen abklären	15
15. Optimierung der Geometrie für die Herstellung von Fresnel- Spiegel- Verdichtern	16
16. Auswertung der Messergebnisse und Berichte erstellen; Sonnenscheibe- Abbild- Diskussion mit Folgerungen	16
17. Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten des Wärmeanteils des von den Solar- zellen nicht konvertierbaren Lichtspektrums, eventuell mit Speicherung	17
18. Theoretische Vergleiche zur Einordnung des HELIOFOL II-Systems	17
19. Vorbereitung der Realisierungsphase / Perspektiven für 1994/96	19
20. Schlussbetrachtung	20
Symbolverzeichnis	22
Literaturverzeichnis	23
Zusammenfassung der Messergebnisse, mit Diagrammen	24
Beschreibung der Testanlage	28
Studien in Bezug auf das HELIOFOL II-System:	Anhang
Kind Richard: [1] Wirtschaftlichkeitsberechnung (kurze Zusammenfassung)	1
Leibfried Ulrich: [2] Intensitätsverteilung der konzentrierten Solarstrahlung	2
Simon und Konrad: [3] Konzeption, Anpassung und Optimierung des Receivers	3
Steiger Heinrich: [5] Optimierung der HELIOFOL II-Geometrie	4
Waser André: [7] Konzeptstudie, Wirkungsgraddiskussion	5
Schema und Bilder	6
Messprotokolle und Tabellen	7
Diagramme	8

Ausgangslage

Solkraftwerke sind in der Dritten und Vierten Welt, aber auch in stärker zivilisierten Ländern da sinnvoll, wo eine **hohe direkte Sonneneinstrahlung** die Regel ist und wo zugleich ein wachsender Energiebedarf und ein stärkeres Umweltbewusstsein nach zusätzlichen oder **umweltschonenden Energieresourcen** verlangt. Wenn ausserdem nicht mit schlechten klimatischen Bedingungen wie Sandstürmen oder schweren Orkanen gerechnet werden muss und keine andere gravierende Luftverschmutzung (z.B. Salzkrustenbildung in Meeresnähe) Abrasion und Ablagerungen verursachen, so ist die Gewinnung von Sonnenenergie mit hoch-effizienter Fotovoltaik, wie ganz speziell mit dem **HELIOFOL II-System**, geradezu herausfordernd und ideal.

Thyl Steinemann als Erfinder des HELIOFOL II- Systems konnte mit Unterstützung des NEFF (Nationaler Energie Forschungs Fonds) schon Ende der 70er Jahre in einer Berner Firma erste Erfahrungen mit der Konstruktion und Ausmessung konzentrierender Fotovoltaik machen. Später leistete er weitere wesentliche Vorarbeit auf privater Basis, indem er in Zusammenarbeit mit zwei Studenten an der HTL Brugg-Windisch (Schweiz) einen selbstgebauten HELIOFOL II- Spiegelkollektor- Prototyp mit 50x50 mm grossen Hochleistungs- Solarzellen während der Saison 1989 austestete. Es konnte mit einem Verdichtungsfaktor bis 48 Sonnen gearbeitet werden, wobei die Zellen aber nur für eine Energiedichte bis 25 Sonnen ausgelegt waren. Die beiden Studenten absolvierten mit der auf dem Dach des Maschinenhauses installierten Testanlage ihre Semester- und Diplomarbeit unter der Leitung des Dozenten Prof. Helmut Faulstich, Abt. Thermodynamik. Die damit gesammelten ermutigenden Erfahrungen führten zur Bestätigung, dass offenbar mit einer weiteren **Verdoppelung der Strahlungsverdichtung** die Effizienz und damit die Wirtschaftlichkeit erhöht werden kann (Mataré [4] 3.6, S.53). Ausserdem wurde Thyl Steinemann bewusst, **dass im HELIOFOL II-System grosse Zukunftsperspektiven liegen**, die zur Lösung der oben angeführten Energieprobleme beitragen können. Um die interessante Entwicklung effizient fortsetzen zu können, fand er mit der Gründung der Firma KOSMO SYNERGIE AG einen Weg, den er nicht mehr im Alleingang nehmen muss.

Die Entwicklungshilfe durch Hilfe zur Selbsthilfe wurde in der letzten Zeit immer mehr als das richtige und sinnvollste Vorgehen erkannt. Gerade die **Elektrizitätsgewinnung aus Sonnenenergie** ist viel effizienter und wirtschaftlicher im Sonnengürtel der Erde als in den klimatisch gemässigten Zonen, was aber einen entsprechenden **Technologietransfer** in die hilfsbedürftigen Länder erfordert. Das dadurch entstehende Zusatzeinkommen der Entwicklungsländer kann unsere Hilfeleistungsverpflichtungen erheblich entlasten. Mit diesem Hintergrund konnte das BEW zur Unterstützung unseres Entwicklungsvorhabens überzeugt werden. Ausserdem besteht gemäss Prof. Dr. Dr.- Ing. Herbert F. Mataré, (Hückelhoven/Los Angeles), des zuständigen Konzentrador-Solarzellen-Experten die reale Aussicht, dass durch die Anspornung der Höchstleistungssolarzellen- Hersteller zur Weiterentwicklung dieser speziellen Zellentechnologie und durch den Ankauf von grossen Mengen solcher Zellen für die Realisation von fotovoltaischen Solarkraftwerken in Megawattgrösse, eine Höchstleistungszelle noch vor der Jahrtausendwende kaum teurer als eine heutige Standard-Solarzelle sein wird (Substratpreis umgerechnet $0.3 \text{ cm}^2/\text{Watt} = 12 \text{ Rappen}$). Diese weiterentwickelten Zellen werden aber im Tropengürtel bis zur **sechshundertneunzigfachen Leistung** aufweisen (siehe [4] 17.3.2, S.254).

Damit wird auch an sonnigen Lagen der Schweiz und Europas die Anwendung von **Höchstleistungs-Fotovoltaik**, besonders mit dem HELIOFOL II-SYSTEM wirtschaftlich. Fotovoltaische Solarkraftwerke sind heute meist die sinnvollsten Stromproduzenten, wenn es um Neuerschliessung von Energiequellen geht, dies nicht nur in Ländern, wo während den heissesten Tages- und Jahreszeiten auch der grösste Energiebedarf anfällt.

Die von **Dr. sc. dipl. Ing. ETH Richard Kind** erarbeitete Wirtschaftlichkeitsstudie (Zusammenfassung Seite 21) bestätigte, dass der relativ hohe Anteil an diffuser Strahlung, wie er für **schweizerische Verhältnisse** typisch ist, nicht zur Folgerung führen darf, konzentrierende Kollektoren seien nicht einsetzbar. Bei Anwendung von **Kogeneration** (also gleichzeitige Wärme- und Elektrizitätsgewinnung mit dem HELIOFOL-System) sind nämlich thermisch auch bei ungünstiger Klimavariante bereits im unteren Temperaturbereich erhebliche Ertragssteigerungen selbst gegenüber sehr guten Vakuum - Flachkollektoren möglich; in nebelarmen Lagen elektrisch auch im Vergleich mit grossflächigen, nicht mit der Sonne geführten Solarzellenmodulen. Es muss natürlich berücksichtigt werden, dass die periodisch zu reinigenden HELIOFOL-Solaranlagen nicht in Gebäude integrierbar, sondern auf Solartrackern am Boden oder auf grösseren Flachdächern zu montieren sind.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

Ziel der Arbeit

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, den Beweis zu erbringen, dass mit dem HELIOFOL-System die fotovoltaische Nutzung der Sonnenenergie technisch und wirtschaftlich wesentlich verbessert werden kann.

Wir erarbeiten die nötige Systemtechnologie, um HELIOFOL II - Solarkraftwerke in der Praxis zu realisieren. Die Systementwurfs- & Planungsphase (1. Projektphase) liefert die Grundlagen zum Bau eines fotovoltaischen HELIOFOL II - Solarkraftwerks. In der Fortsetzung dieser Grundlagenentwicklung wird, im Zusammenhang mit Bestellung und Bau solcher Kraftwerke, die Seriefabrikation von Verdichtern finanziert und von Höchstleistungs-Solarzellen, die dann ebenso für hocheffiziente Kleinanlagen eingesetzt werden können.

Lösungsweg

Die verschiedenen Prognosen über die Verbilligung der Solarmodule haben sich alle als viel zu optimistisch erwiesen. Auch wenn Höchstleistungs-Solarzellen ein Mehrfaches von Standard-Solarzellen kosten, lohnt sich daher bis auf weiteres die kompliziertere Technik der Strahlungsverdichtung und der Sonnenmitführung, wodurch die Anzahl benötigter Solarzellen um etwa 99% (!) reduziert werden kann.

Mit der bisher üblichen linearen Verdichtung oder gar einer zweidimensionalen Konzentration der Sonnenstrahlung auf die Oberfläche von Spezial-Solarzellen war es nicht möglich, eine genügend gleichmässige Strahlungsdichte zu erreichen. Dies hatte im einzelnen zur Folge, dass die mögliche Maximalleistung einer Solarzelle nicht ausgenutzt wird, während gleichzeitig gewisse Stellen der Zelle durch Überlastung vorzeitig altern oder zerstört werden.

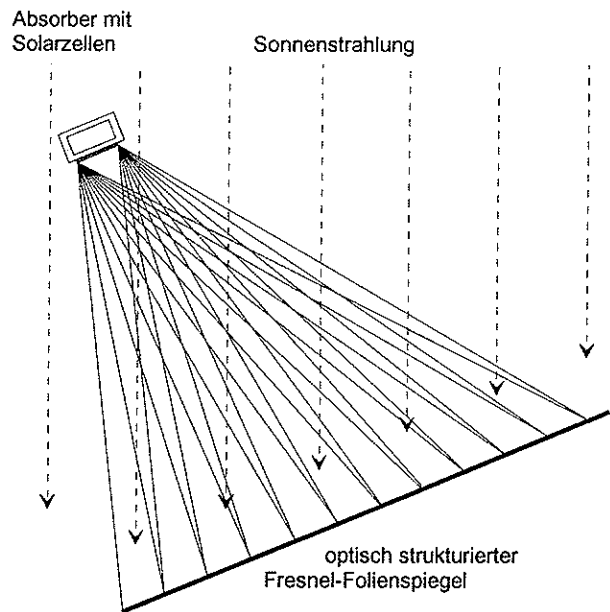
Die Verdichtung der Sonnenstrahlung geschieht gemäss Beschreibung in unserem Patent A 378 268 durch definierte, mehrfach flächenmässige Überlagerung von Strahlungsbändern mittels optisch strukturierten Fresnel-Folienspiegel-Elementen. Nur so ist eine genügend gleichmässige Strahlendichte auf der Solarzellen-Oberfläche erreichbar, womit die Maximalleistung der Solarzelle wohl gewährleistet, aber nicht überschritten wird. Damit kann, wie durch Versuche bereits im Jahr 1979 nachgewiesen werden konnte, eine Leistungssteigerung um einen Faktor 1,2 bis 2 und eine Verbesserung des Erntefaktors der Solarzellen erreicht werden.

Mit dem vorliegenden 1. Teil des Projektes (Systementwurf- & Planungsphase) wurden vor allem grundlegende Parameter erarbeitet für die Herstellung von HELIOFOL II - Fresnel-Spiegel-Strahlungsverdichtern als Energiesammler. Ausserdem war vorgesehen, das System theoretisch zu optimieren. > Siehe Studien 2 - 5.

Es wurden Höchstleistungs-Solarzellen (AlGaAs/GaAs und Si-Multijunction-Konzentratorzellen) beschafft und ausgemessen. Dazu mussten ein neuer Arbeitsprototyp und eine kompakte, stabile und exakt justierbare Nachführanlage gebaut werden, mit welchen vor Ort verschiedene Systemvarianten studiert und durchgetestet werden konnten. Der Prototyp wurde so gebaut, dass drei verschiedene Grössen und Sorten von Solarzellen unter variabler und weitgehend definierter Strahlungsdichte ausgetestet werden können.

Im Zusammenhang mit dem Problem der Zellenkühlung musste auch die Frage der Abwärmennutzung, in Anwendung ihrer Speichertechnologie geklärt werden, um den Gesamtwirkungsgrad eines HELIOFOL-Solarkraftwerkes zu verbessern. > Siehe Studie 2.

Das Forschungsprojekt wird nicht nur als Beitrag der reichen Schweiz zum Technologie-Transfer in weniger reiche Länder betrachtet, sondern wird im weiteren auch die Fotovoltaiktechnologie in Europa befruchten.



Prinzip der Strahlungsverdichtung nach dem HELIOFOL II - Patent (Bild 1)

Hauptergebnisse

Als Wichtigstes konnten **Konzentrator-Solarzellen** für hohe Einstrahlungsleistung (für 300 bis 1500 Sonnen) beschafft werden, die auf dem Markt noch nicht erhältlich sind. Diese Hightech Spezial-Solarzellen aus Silizium, bzw. GaAs in den Dimensionen von nur 0,5 bis 1,0 cm² leisten bei einer Strahlungsdichte von mindestens 100 Sonnen und einem entsprechenden Wirkungsgrad von 16,5 bis 21,6 % **mehr als das Hundertfache** von Si-Solarzellen in marktüblichen Modulen. Die ersten erhaltenen Zellen haben wir in einer improvisierten kleinen Nachführeinrichtung getestet und ausgemessen und dabei festgestellt, dass unter den GaAs-Zellen aus Russland sehr grosse Unterschiede in ihren Leistungswerten bestehen (siehe Diagramme 4,5 und Tabelle 11). Aus einer zweiten Lieferung konnten wir mittels Einzelmessungen am Solar-Messlabor des PSI (Bild 5.) genügend Zellen für unseren Prototyp aussortieren, die (bei einer Sonne) einen Wirkungsgrad zwischen 14,5 und 16,2 % aufwiesen. Bei 100 Sonnen soll sich gemäss Angaben der Hersteller deren Wirkungsgrad auf ca. 20% erhöhen. Die mit dem Prototyp gemessenen Werte erreichten allerdings mit unseren Mess- und Berechnungsmethoden keine 20% (siehe Diagramme und Testprotokolle im Anhang).

Wir bauten selbst einen **Testkollektor** mit **112** einzeln auf die Solarzellenebene ausgerichteten **Oberflächenspiegeln** (Dimension der Spiegel ca. 10x220 mm) und mit drei Sorten **Konzentratorzellen** (Si und GaAs) auf einem gemeinsamen **Absorber** (Bild 8), der geneigt und durch **Wasserkühlung** temperaturstabilisiert werden kann, sowie eine **siderische Sonnenmitführanlage**, die den besonderen Ansprüchen für hohe Genauigkeit, Stabilität und Kompaktheit entspricht (Bilder 9, 15). Sie ist mit einer manuellen Feinjustierung ausgerüstet.

Der Testkollektor wurde nicht auf höchsten Wirkungsgrad ausgelegt, sondern so, dass mit ihm möglichst **vielseitige Testmöglichkeiten** offen sind, um breitgefächerte Parameter und Messwerte als Grundlage für die **Systemoptimierung** verfügbar zu machen. Nicht hohe Leistungsdaten, sondern **eindeutige Tendenzen der Parameter** waren uns in dieser Testphase wichtig.

Die Messergebnisse bestätigen, abgesehen von der schlechten Leistung der Zellengruppe 1...10 und fehlerhafter Solarzellen (insbesondere der Zellen 3 u.16), unsere vorangegangenen Berechnungen. Für die Zellengruppe 11...20 wurden Zellen mit den höheren Wirkungsgraden ausgelesen. Leider sind bei den Applikationsarbeiten etwa acht der besten Zellen zerstört worden.

Die Messdaten sind im Anhang des kompletten Schlussberichtes in den Messdatentabellen, Messprotokollen und Diagrammen enthalten, welche von KOSMO SYNERGIE AG (bei begründetem Interesse) angefordert werden können. Die Diagramme sind vorbereitende Auswertungen der Messdaten für die HELIOFOL II-Systemoptimierung.

Noch offene Probleme

Infolge der verschiedenen zeitlichen Verzögerungen wegen schlechten Wetters und wegen Schwierigkeiten mit dem speziell für die Messungen beschafften transportablen Rechner und mit dem Messdatenerfassungsprogramm konnten die **Optimierung der Fresnel-Folienspiegel-Elemente** und die **Vorbereitung der Realisierungsphase** nicht wie vorgesehen in der ersten Projektphase durchgeführt werden. Ausserdem zeigte sich, dass die erhaltenen russischen Solarzellen in einem ungenügenden technischen Entwicklungsstand produziert wurden. Inzwischen werden bereits bessere Fabrikationsmethoden angewendet. Wenn man solche Zellen für die weitere Entwicklung des HELIOFOL II-Projektes verwenden möchte, müssten diese jedenfalls erst einen mit den USA-Zellen vergleichbaren hohen Entwicklungsstand erreichen.

Im Speziellen geht es darum, dass die verwendeten russischen Zellen im Gegensatz zu den USA-Zellen **keine Oberflächen-Schutzschicht** und ausserhalb der aktiven Fläche **keine Lötkontaktflächen** aufweisen, was bei der Applikation der Anschlussdrähte grosse Schwierigkeiten und zu viele Verluste verursachte (ausreissen der Kontaktfingerstruktur, z.T.samt Teilen aus der kristallinen, sehr zerbrechlichen Zelle; siehe Anhang, Bilder 35 bis 38).

Die Herstellungstechnologie des Strahlungsverdichters für dessen Seriefabrikation, sowie die Weiterentwicklung von Höchstleistungs-Solarzellen mit Wirkungsgraden um 30% und höher waren nicht Aufgabe dieser ersten Projektstufe, obwohl diesbezügliche Gespräche bereits stattgefunden haben und Lösungsmöglichkeiten vorgeschlagen wurden; sie werden in der folgenden Projektphase Gegenstand der Untersuchungen und Problemlösungen sein.

Auch die **praktische Beweiserbringung** der technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit des HELIOFOL II-Systems ist für die zweite Projektstufe vorgesehen, nachdem der theoretische Beweis schon erbracht wurde.

Die Lösung der einzelnen Teilaufgaben

1. Start und Projektplanung

Die vorliegende 1. Projektphase konnte nach Verzögerungen infolge der Durchführung von Bundes- Sparmassnahmen erst im April 1993 begonnen werden, was mit anderen Behinderungen zusammen bewirkte, dass die 1. Projektphase erst im Juni 1994 abgeschlossen werden konnte. Die Projektplanung wurde von Kurt Stegmüller durchgeführt. Anhand von Netzplan und Tabellen im Programm "MS Project" standen die Daten für die einzelnen Teilaufgaben und Unteraufträge jederzeit übersichtlich zur Verfügung und konnten jeweils den Gegebenheiten des Projektfortschrittes entsprechend angepasst und ergänzt, bzw. korrigiert werden.

2. Firmenkontakte und Abklärungen mit Deutschland, Österreich, Russland und USA

Strahlungsverdichter: Ausführliche Besprechungen und Vorabklärungen über die Herstellung von Verdichterfolienspiegeln und die Seriefabrikation kompletter Verdichterelemente mit Spannrahmen wurden mit HTCSolar, Lörrach und mit Lechner Colux GmbH in Singen durchgeführt, die weltweite Erfahrungen hat mit hochreissfesten und Ultraviolett-resistenten Folienbedachungen. Ein entsprechendes Angebot liegt vor für rund 5000 SFr pro komplettes Element à 12,2 m². Ein österreichischer Maschinenbauer offerierte die Zusatzeinrichtungen für das Prägen der optischen Struktur der Verdichterfolien. Die Verspiegelung von Folien ist Stand der Technik.

Solarzellen: Während für den Prototyp HELIOFOL II/1989 in Brugg/Windisch auf dem Markt erhältliche deutsche Solarzellen für maximal 25 Sonnen eingesetzt wurden, mussten nun Höchstleistungs-Solarzellen beschafft werden für eine Einstrahlungsintensität von über 100 Sonnen. Wir erhielten solche durch Vermittlung von HTCSolar und Prof. Mataré. Unsere direkten Firmenkontakte erbrachten keine akzeptablen Offerten für einige Dutzend Zellen wegen hohen Kosten für die Auslese. Für eine Bestellung in der Grösse von Kilowatt lohnt sich aber die Ingangsetzung des speziellen Fabrikationsprozesses auf den zurzeit voll für die Computerchipsproduktion ausgelasteten Anlagen in den USA. Für die Weiterentwicklung zur Seriierufe von Höchstleistungssolarzellen mit Wirkungsgraden über 30% muss ein Entwicklungsbeitrag geleistet werden.

3. Beschaffung von Höchstleistungs-Solarzellen für minimal 75 cm² Absorberfläche

Die HTC Solar GmbH, Lörrach vermittelte uns GaAs-Höchstleistungs-Solarzellen aus Russland (mit Wirkungsgraden bis 16.5% Bilder 6, 8).

Beschreibung der Zellen von der Lieferantin

Zellenaufbau:	Halbleiterzelle in Heterostruktur AlGaAs / GaAs
Produktionsmethode:	Flüssigkeitsepitaxie (LPE = liquid phase epitaxy)
Antirefektionsschicht:	Sie verhindert die Reflektion der auftretenden Strahlung
Fensterschicht:	p-Al _{0,85} Ga _{0,15} As, Zn-dotiert, p = 10 ¹⁸ cm ⁻³ (85% AlAs). Diese Schicht ist weitgehend transparent und dient zur Verminderung der Oberflächenrekombination
Diffusionsschicht:	p-GaAs, Zn-dotiert
Pufferschicht:	n-GaAs, Sn-dotiert, n = 3x10 ¹⁷ cm ⁻³ . Fotoaktive Schicht
Substrat / Grundmaterial:	n ⁺ -GaAs, Sn-dotiert, n = 10 ¹⁸ cm ⁻³ ; (orientiertes Substrat). Hochdotiert, dadurch kleiner elektrischer Widerstand

Kontaktierung der Zelle

Die Kontaktierung erfolgt durch Aufdampfen und Galvanisieren folgender Metalle:

(Au + Zn) + Ni auf der p-Seite

(Au + Sn) + Ni auf der n-Seite

Das weitere Verarbeiten der GaAs-Zellen (Auflöten auf Untergrund und Anbringen der Anschlussdrähte) erfolgt mit Lötzinn 60%Sn und 40% Pb.

Einfluss der Temperatur

Der Temperaturkoeffizient des Wirkungsgrades beträgt -0.15% / Kelvin für den Temperaturbereich von 20...100°C.

Der Temperaturkoeffizient der Zellenspannung beträgt ungefähr -2 mV/Kelvin. Die Betriebstemperatur der Zelle darf maximal 120°C betragen.

Einfluss des Einstrahlungswinkels

Eine Abweichung des Einstrahlungseinfallwinkels von $\pm 30^\circ$ in Bezug zum senkrechten Strahlungseinfall führt zu keiner nennenswerten Reflektionserhöhung.

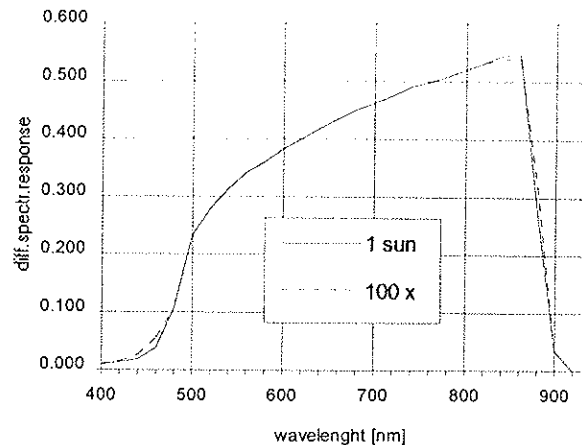
Beschaffenheit der Oberfläche

Die Oberfläche besteht aus einer antireflektierenden Beschichtung. Ein Schutz vor Feuchtigkeit und Berührung mit Wasser ist unbedingt erforderlich.

(>> Bildung von hochgiftigem AsH_3 ; Zerstörung der Zelle).

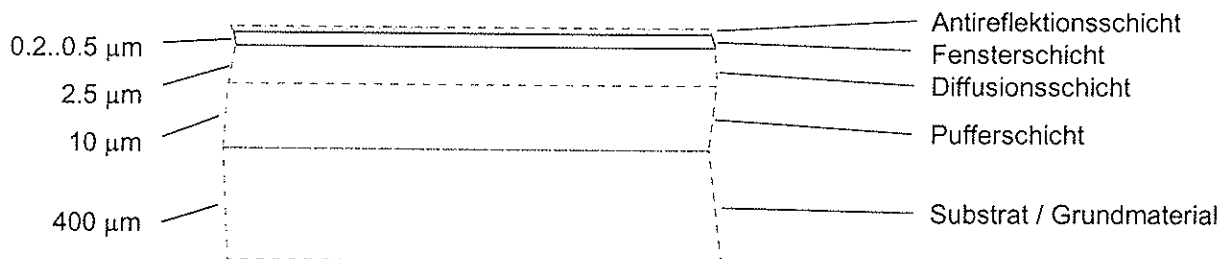
Lötvorschriften

Lötzinn Sn 60% + Pb 40%; Löttemperatur max. 220°C ;
Lötzeit einige Zehntelsekunden; Lötflussmittel aus Russland verwenden.



Spektrale Empfindlichkeit (Bild 2)

Bild 3: Zellenquerschnitt



Die frontseitige Kontaktierung erfolgt durch das Auflöten eines geglühten, verzinnnten Kupferdrahtes $\varnothing 0.2\text{mm}$. (Siehe **Messprotokoll** ISE TC JP1MR-1, Nr.1).

Prof.Dr.Dr.Ing.Helmut F.Mataré beschaffte uns für die Versuche aus USA neben GaAs-Konzentrator-Solarzellen mit Wirkungsgraden bis 16.5% auch solche aus Silizium mit Wirkungsgraden bis über 20% (Bild 6).

4. Ausmessen der Solarzellen und Verifizieren der Leistungsdaten

Die erhaltenen Höchstleistungs - Konzentratoren - Solarzellen haben wir vor der Applikation auf den Absorber des Prototyps mit einer kleinen improvisierten, manuell ungefähr zur Sonne ausrichtbaren Vorrichtung (Bild 4) auf dem Sitzberg (900 m.ü.Meer), vor unserem Atelier in Höri (Bild 15) und auf dem Dach unseres Geschäftssitzes in Bern (Bild 23) an der **direkten Sonne** ausgemessen. Als Referenz diente uns ein geeichtes Pyranometer, das uns freundlicherweise vom **Paul Scherrer Institut** zur Verfügung gestellt wurde und das wir sowohl als Solarimeter (für die Globalstrahlungsmessung), wie auch als Pyrheliometer (mit einem entsprechenden Tubus) einsetzen.

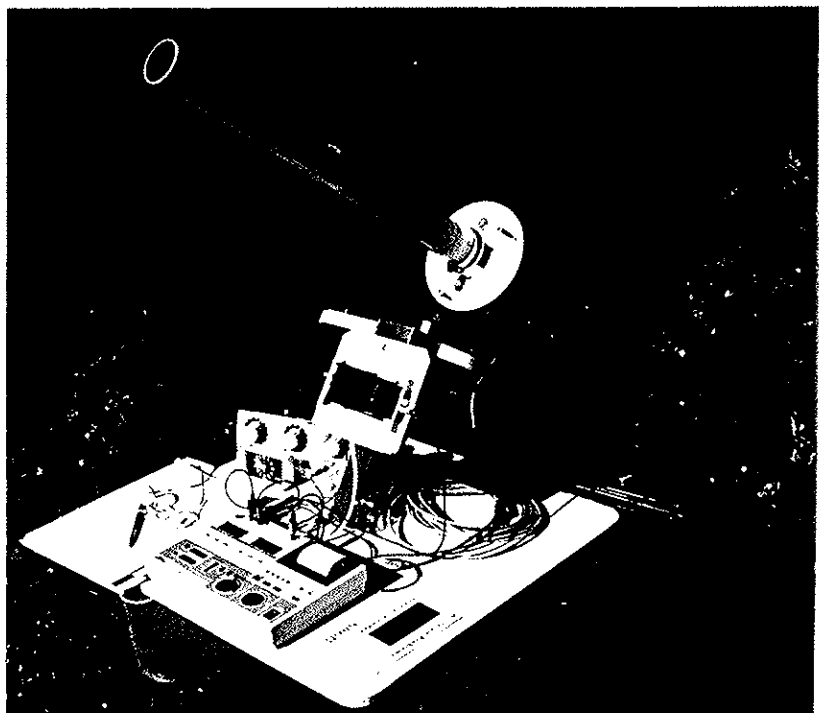


Bild 4: Zellen-Messvorrichtung; Messungen auf dem Sitzberg ZH

Dieselben Zellen haben wir zur Kontrolle an zwei Messtagen im Beisein von T. Steinemann auch am **Paul Scherrer Institut**, Würenlingen (PSI, Abt. Solare Messtechnik) auf der institutseigenen Messanlage nochmals einzeln ausgemessen (Bild 5). Es wurden Messungen durchgeführt sowohl mit einem Tubus über der Zelle, (der die Globalstrahlung abschirmt) in Bezug zur Direktstrahlung I_n , als auch ohne solchen Tubus, in Bezug zur Globalstrahlung G_n (siehe Diagramme).

Die gute Übereinstimmung der Messergebnisse bestätigte, dass die Genauigkeit unserer Messeinrichtung mindestens nahe am internationalen Standard liegt und dass unsere Messungen zuverlässig sind.

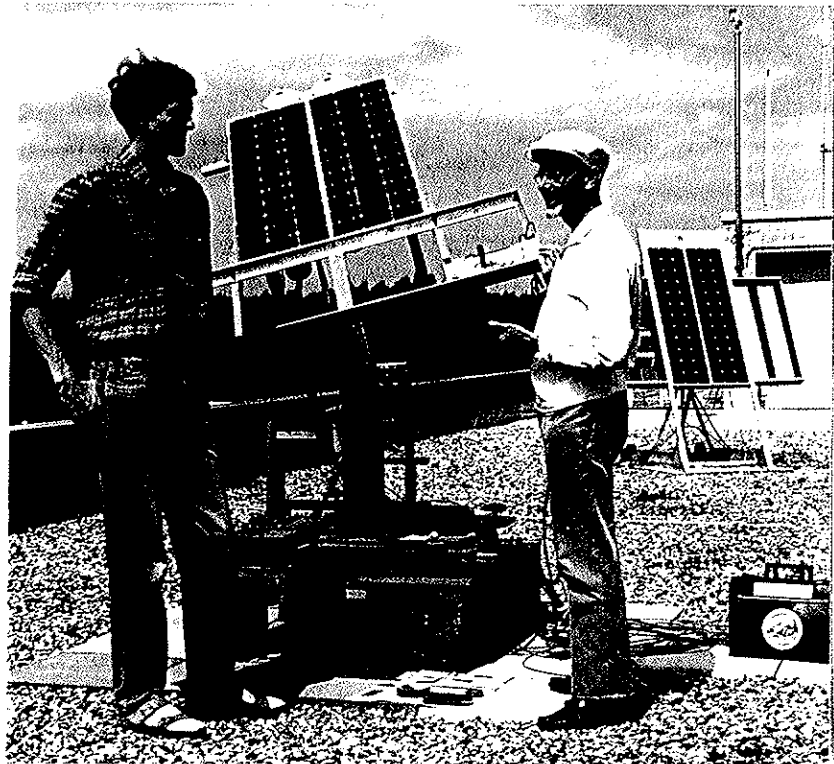


Bild 5: Zellenmessungen auf dem Paul Scherrer Institut

5. Applikation der Solarzellen auf Unterlagen und Absorber

Nach der Ausmessung der von HTCS erhaltenen GaAs-Konzentratorzellen konnten diese nach Leistungsgruppen aussortiert werden. Zwecks Austauschbarkeit der Zellen auf dem Absorber (und in weiser Voraussicht, dass Zellen während des Betriebes degradieren oder zerstört werden könnten) löteten wir jede für die Tests verwendbare Zelle auf ein eigenes, zellenbreites **Absorberplättchen** aus Kupfer, mit Loch zum Aufschrauben auf den Absorber (Bild 6). Für das Auflöten der Zellen auf diese Kupferplättchen fertigten wir eine spezielle **Löteinrichtung** an (Bild 7). Diese besteht aus einer elektronisch temperaturgesteuerten Lötstation, die anstelle einer Lötspitze ausgerüstet ist mit einer **Aufnahmevorrichtung** für das Absorberplättchen und für die Zelle, und mit einem gefederten Niederhalter, unter den auch das **Anschlussdrähtchen** mit grösster Sorgfalt positioniert werden kann.

Mit den schlechtesten Zellen wurden dann die ersten Lötversuche gemacht (Bilder 29..31) nach Angaben des Herstellers und von HTCS.

Nach den ersten Erfahrungen, bei denen leider auch gute Zellen zerstört wurden, (siehe Bilder 35..38) mussten wir entgegen dem Vorschlag von HTCS, die Anschlussdrähtchen auf einen Durchmesser von 0.30 mm zu dimensionieren, deren Durchmesser auf **0.20 mm** reduzieren, um ein Ausreissen der Zellenoberfläche infolge der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von GaAs und Cu auszuschliessen.

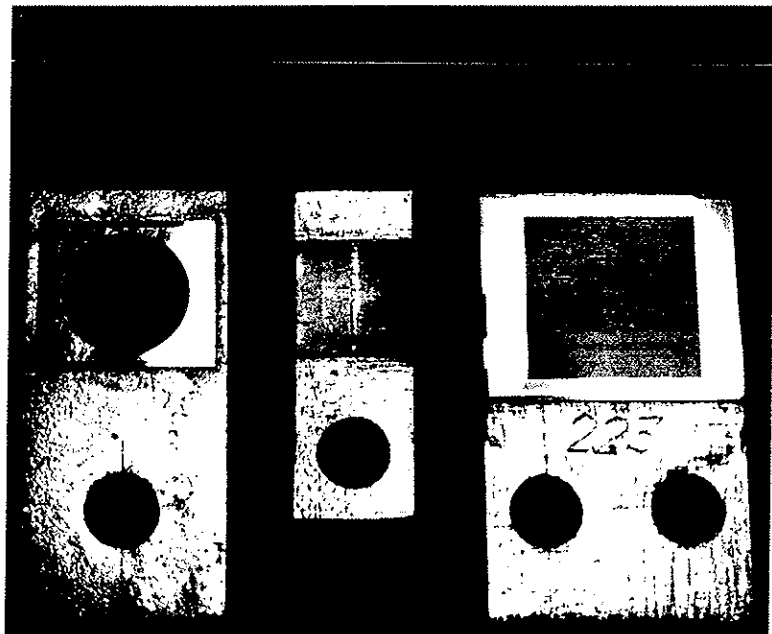


Bild 6: Auf Cu-Absorberplättchen aufgelötete Konzentratorzellen



Bild 7: Thermostatisch beheizte Zellenlötvorrichtung

Applikationsvorgang:

- Einlegen des nach der aufzulötenden Zelle nummerierten Cu-Plättchens (7x17x0.5mm, plangerichtet) in die auf etwa 100°C vorgewärmte Lötvorrichtung
- Einlegen der Zelle auf das oben vorverzinnte Cu-Plättchen, Zelle mit Rückseite nach unten, Kontaktgitter oben
- Aufheizen der Lötvorrichtung auf (maximal) 215°C
- Nach dem Schmelzvorgang sofort Heizstrom ausschalten und Unterlage mit zwei kalten Stahlprismen unter den Schmelzpunkt des Zinns abkühlen; Cu-Plättchen mit aufgelöteter Zelle der Vorrichtung entnehmen und abkühlen lassen
- Aufgelötete Zellen unter 500W Halogenlicht nachmessen und nach ihrer Leistung sortieren Cu-Plättchen mit Zelle in die auf etwa 100°C vorgewärmte Lötvorrichtung einlegen, Anschlussdrahtstück (geglühter und verzinnter Cu-Draht $\varnothing 0.2 \times 10 \text{mm}$) einlegen und mit Niederhalter fixieren
- Zwei sehr kleine Schnitzel von Lötzinn $\varnothing 0.7$ mit (Flussmittelseele) seitlich an den Kontaktdraht anlegen
- Aufheizen der Unterlage auf (maximal) 215°C
- Nach dem Schmelzvorgang sofort Heizstrom ausschalten und Unterlage mit zwei kalten Stahlprismen unter den Schmelzpunkt des Zinns abkühlen; Cu-Plättchen mit aufgelöteter Zelle und Kontaktdraht der Vorrichtung entnehmen und abkühlen lassen.

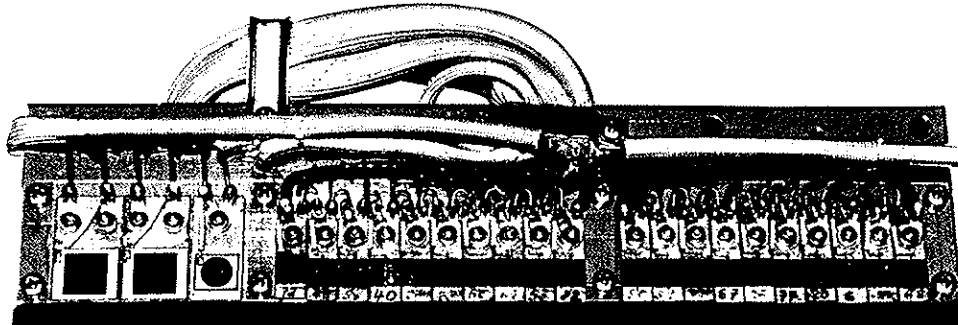


Bild 8: Absorber mit dem Array der fertig montierten 23 Höchstleistungs-Solarzellen

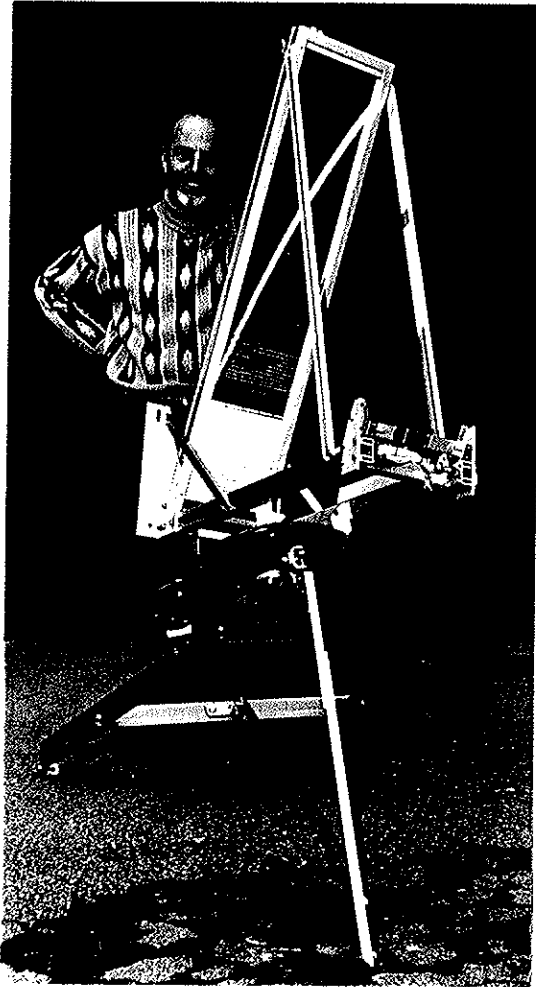


Bild 9: Tracker mit Prototyp (im Bau)

6. Nachmessung der applizierten Zellen bei 1 Sonne

Nach dem Auflöten der Zellen auf die Cu-Absorberplättchen und dem Anlöten der Kontaktdrähtchen an jede Zelle wurde zur Kontrolle und Auslese nochmals eine Leistungskontrolle vorgenommen. Dies musste mangels Sonnenschein unter 500 Watt Halogen-Kunstlicht durchgeführt werden. Es zeigten sich unerwartet grosse Veränderungen und Unterschiede in der Zellenleistung, bzw. im Zellenwirkungsgrad. Drei Zellen hatten sich offenbar bei den Applikationsvorgängen so stark verschlechtert, dass sie ersetzt werden mussten.

Am 29. April 94 konnten erstmals alle applizierten und auf dem Absorber im Prototyp montierten Zellen unter direktem Sonnenlicht ausgemessen werden (Bilder 15; TABELLE1.XLS /Seite 1; Diagramm SONNE1.XLS).

7. Standort für Testanlage auswählen

Vorerst sahen wir vor, dass wir die Messungen auf den institutseigenen Sonnenmitführanlagen des PSI (Paul Scherrer Institut Würenlingen) oder des ITR (Interkantonales Technikum Rapperswil SG) durchführen würden. Nach den Solarzellenmessungen am PSI stellte sich bei genauerer Abklärung aber heraus, dass die Durchführung von Tests mit dem HELIOFOL II - Prototyp sowohl am PSI in Würenlingen, als auch an den Ingenieurschulen Rapperswil oder Brugg - Windisch aus verschiedenen Gründen (umständliche Hin- und Hertransporte und Auf- und Abmontage des Prüflings, anderweitige Belegung der Nachführanlagen) nicht sinnvoll oder nicht möglich war. Ausserdem sind im Winterhalbjahr in den Niederungen kaum Sonnenstunden mit genügender Inten-

sität zu erwarten. Diese Standorte fielen also ausser Betracht, und es zeigte sich, dass es sehr vorteilhaft war, die meisten Messungen direkt vor dem eigenen Atelier am Rande des Zürcher Flughafens durchführen zu können, sobald es die (viel zu seltene) Sonneneinstrahlung erlaubte, denn der Aufwand, bis die Messtechnik beherrscht wurde, war grösser als erwartet und erforderte Werkzeuge, Geräte und Maschinen in Griffnähe.

8. Optimale Konstruktion des Solar-Trackers und der Substrukturen evaluieren

Da auch die Sonnenmitführanlage für die seinerzeitigen Messungen an der Ingenieurschule Brugg (Saison 1989) zu gross und stark überholungsbedürftig war, haben wir (um unabhängig selbst Messungen durchführen zu können) uns entschlossen, eine neue, kompakte, stabile und sehr exakte, nicht an einen Standort gebundene Sonnenmitführanlage (Solar-Tracker, Bild 9), zu bauen und eine eigene komplette Messeinrichtung zu beschaffen. Eine wichtige Bedingung war, dass die ganze Testanlage mit Messdatenerfassung leicht transportabel sei und möglichst ohne Netzanschluss funktioniere.

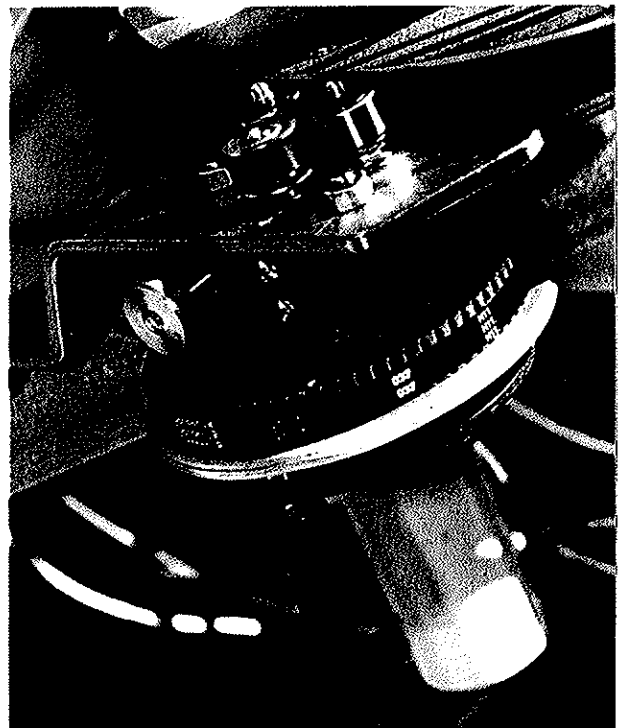


Bild 10: Omega-Zahnriemenantrieb für Azimut

Die Sonnenmitführanlage ist mit einem (gelben) Getriebemotor 12 VDC ausgerüstet, der über einen Zahnriementrieb den Omega-Zahnriemen-Azimutantrieb (Bild 10) betätigt, und zwar über dieselbe Welle, auf der auch ein Handrad mit Rutschkupplung sitzt, sodass unabhängig voneinander sowohl Handbetrieb als auch automatischer Betrieb möglich ist.

Die Sonnenmitführanlage (Bild 9), eine elektronische Last (Bild 42) und die Sonnenmitführelektronik (Bild 11) bauten wir selbst in unserem Atelier. Wir beschafften einen transportablen Rechner (Toshiba T-6600 C 66MHz/500MB/10.5 TFT Color LCD, und eine leistungsfähige Messdatenerfassungs-Software in Deutscher Sprache (ZENON/ Workmate). Eine achtkanalige Messpegel-Verstärkerbox (Bild 11) und ein 20 Meter langes mehradriges abgeschirmtes Messkabel wurden uns verdankenswerterweise vom PSI zur Verfügung gestellt. Damit konnten wir die Messwerte mit 0..1.00 Volt Analog-Pegel auf grössere Distanz vom HELIOFOL II - Prototyp aus dem Freien zum Messplatz übertragen. Die ganze Messeinrichtung stand uns anfangs 1994 für die ersten Probemessungen zur Verfügung. (> Siehe Anlagebeschreibung im Anhang).

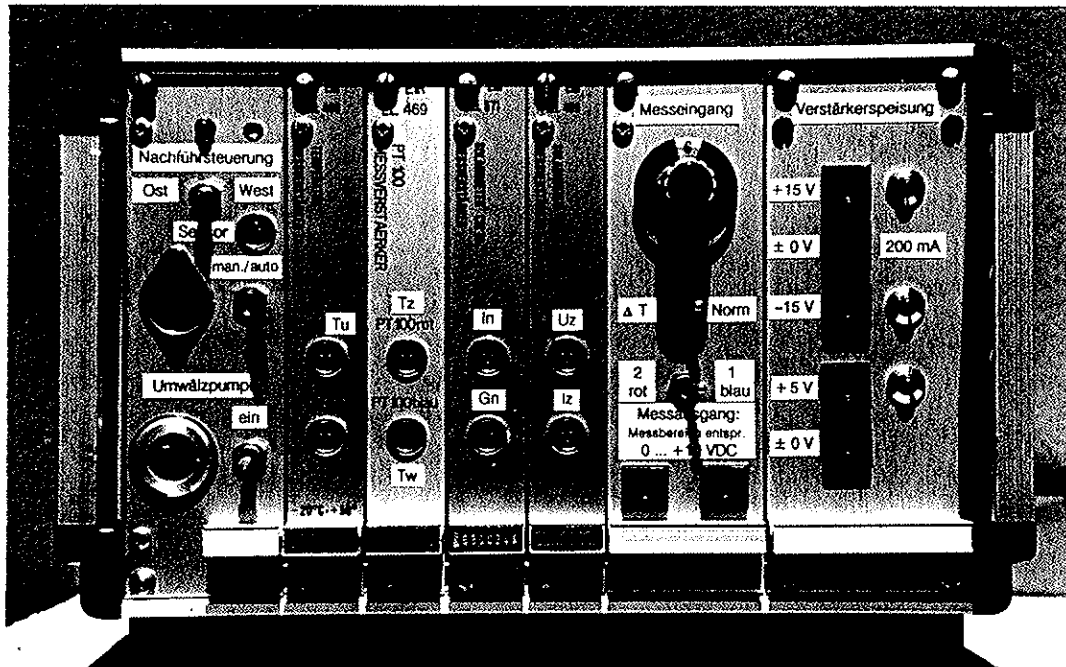


Bild 11: PSI - Messverstärkerbox mit elektronischer Sonnenmitführsteuerung

Die Erfahrungen bei den Messungen mit der selbstgebauten Sonnenmitführanlage zeigten, dass nicht nur für die Messungen, sondern für das HELIOFOL-System generell **zweiachsige Sonnenmitführungen** am zweckmässigsten wären, welche die Kollektoren **azimutal drehen** und in **der Senkrechten neigen**. Wenn die Kollektoren parallel zur Erdachse nachgeführt werden (wie auf unserem Solartracker) kommen sie vor und nach dem Sonnenhöchststand in eine Schiefelage, in welcher durch die Schwerkraft unzulässige Verzerrungen der Verdichter entstehen können, die zu einer Dejustierung der Strahlungsverstärkung führen und einen Leistungsabfall bewirken. Wir mussten bei den Messungen manuell Massnahmen treffen, um diesem Einfluss entgegenzuwirken, was bei einer grösseren Anlage natürlich nicht infrage kommt.

9. Optimierung der Form des Verdichters (V-Form, Parabel, gebrochene Parabel)

Wir entschlossen uns dieselbe V-Form mit einer Neigung von 25° für den neuen Test- Prototyp HELIOFOL II/93 zu verwenden, wie sie sich beim Test-Prototyp HELIOFOL II/1989 bewährte.

Aus den Auswertungsdiagrammen (Diagramme LAGE1356.XLS, LAGE10.XLS) ergibt sich, dass die Beschattung der reflektierten Strahlung durch die Spiegel selbst gegen die äussersten Spiegelpositionen hin stärker zunimmt als angenommen. Im weiteren sei hier auf die entsprechenden Konzeptstudien von DYNASYSTEM [4] und HOLOTEC [6] hingewiesen (siehe Anhang).

Sofern es praktisch durchführbar ist, wäre eine **Zweiteilung der Spiegelfläche** in Annäherung an eine Parabelform wünschbar, um die Eigenbeschattung zu reduzieren oder sogar aufzuheben.

10. Bau eines kleinen Prototyps HELIOFOL II/93 mit 112 Spiegeln

Im eigenen Atelier bauten wir den Prototyp HELIOFOL II/93 nach den gleichen Prinzipien wie den Vorgänger von 1989, der sich bestens bewährte.

Allerdings stellte sich bei der Justierung der 112 Spiegel (Bilder 12, 13) heraus, dass wir durch die notwendige Erhöhung der Genauigkeit der Strahlenreflektion auf die 7×7 mm kleinen GaAs-Höchstleistungs-Solarzellen bei den Spiegel-Justierarbeiten an die Grenzen der Stabilität unserer Laser-Justiereinrichtung stiessen. Wir waren mitten in den Arbeiten gezwungen, die improvisierten Parallelführungen der Laseranlage zu demontieren und auf eine höhere Genauigkeit zu überarbeiten.

Wir konnten dann sämtliche 112 Spiegel so exakt justieren, dass ein Laserstrahl von rund 1.5 mm Durchmesser auf der Zellenebene mit einer Genauigkeit von etwa 0.5 mm auftrifft (das entspricht bei der grössten Spiegel-distanz rund 0.5 mrad, bzw. $1/18$ des auf die Zellen projizierten Sonnenbildes). Die weit aussen liegenden Spiegel stellten die höchsten Anforderungen an Sorgfalt und Geduld beim Justieren.

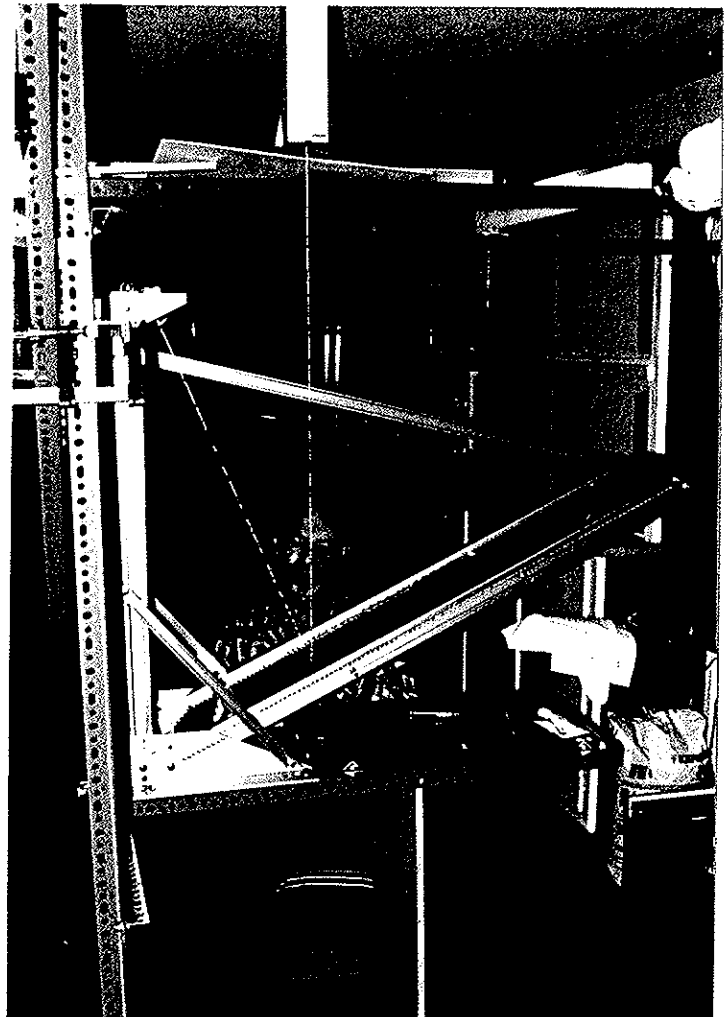


Bild 12: Laser-Justieranlage für die 112 Spiegelstreifen

11. Montage des Prototyps HELIOFOL II/3 auf die Sonnenmitführplattform

Für die Deklinationseinstellung musste der Prototyp verstellbar und trotzdem stabil auf der Drehscheibe der Sonnenmitführanlage montiert werden (Bild 15). Die Deklinationseinstellung geschieht grob durch Lösen und Wiederanziehen von zwei Schraubenverbindungen anhand des Schattenwurfs vom Sensor der automatischen Sonnenmitführsteuerung. Für die Feineinstellung steht eine Gewindespindel zur Verfügung, während auf der Mattscheibe das durch eine Lochoptik erzeugte Abbild der Sonne im Fadenkreuz (Bild 14) beobachtet wird, was eine sehr exakte Einstellung erlaubt.



Bild 13: Zellenarray mit Target (weisse Fläche mit 3 Linien) zum Justieren der Spiegel mit Laserstrahl



Bild 14: Sonnenabbild/Mattscheibe

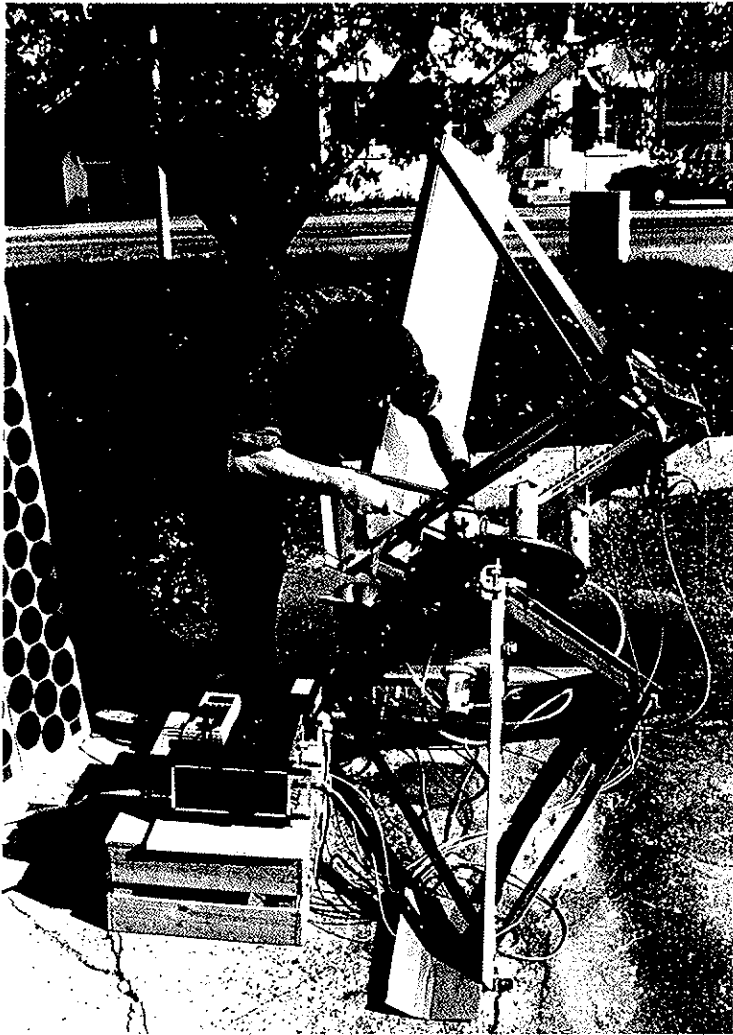


Bild 15: Einstellung der Deklination am Prototyp vor dem Atelier in Höri

12. Installation der Testanlage

Nachdem feststand, dass die Messungen in eigener Regie durchgeführt werden, blieb die Frage des Standortes für die Messungen vorerst offen. Wir begannen ohnehin vorerst mit Probemessungen unter einer Halogen-Kunstlichtquelle in unserem Atelier in Höri. Es war dann naheliegend, den Prototyp im Freien gleich auf dem Vorplatz des Ateliers aufzustellen, während die Messungen vom Atelierraum aus gesteuert und registriert wurden (Bild 15). Sofern es das Wetter erlaubte, konnte vom frühen Morgen bis gegen 17 Uhr gemessen werden. Um Vergleiche in Bezug auf die Messung der Globalstrahlung ziehen zu können, dislozierten wir die ganze Messeinrichtung mit Prototyp am 2. Mai an den Siedlungsrand von Höri mit freier Sicht von Osten bis Westen zum flachen Horizont der Flughafenumgebung (Bild 16).

13. Messungen mit den Zellen im Prototyp HELIOFOL II/3 mit 100 Sonnen

Anfänglich hatten wir fast unüberwindliche Schwierigkeiten mit dem an sich ausserordentlich interessanten und vielseitigen Messdatenerfassungsprogramm. Einerseits wegen Unkenntnis des Anwenders und wegen einigen Kinderkrankheiten des Programms (Abstürze, Triggerprobleme), andererseits wegen fehlenden Features,

mit denen beim Programmkauf gerechnet wurde (zwei Analogausgangskanäle der Messdatenerfassungskarte "Workmate" waren aus Softwaregründen nicht benutzbar). Dank guter Verständigung zwischen T. Steinemann (in unserem Atelier) und dem Programmentwickler in Österreich konnten dann einige Fehler und Missverständnisse ausgemerzt und mit einem Zwischen-Update auch der Datentransfer in die Excel Datenauswertung vereinfacht werden. Bis es soweit war gingen aber trotz Nacht- und Wochenendarbeit mehrere Wochen verloren. Dass das ZENONMEA Programm in Deutscher Sprache läuft, schätzten wir sehr.

Jörg Lichtin, ein Mitarbeiter der Satronic AG, Dielsdorf überprüfte am 22. März 1994 den elektrischen Teil unserer Messdatenerfassungseinrichtung (von den Solarzellen über die PSI-Messbox und die Anschlussbox T51 zum Rechner Toshiba 6600 ins Messdatenerfassungsprogramm ZENONMEA) hinsichtlich richtiger Programmierung und einwandfreier Eichung. Er half uns auch die Messdatenübertragung richtig in den Griff zu bekommen. An diesem Tag konnten wir die ersten Messungen mit der bereitstehenden Messanlage (Prototyp, Sonnenmitführeinrichtung, Messbox, Kühlkreislauf, Solargeneratoren, Solarbatterie) im Freien durchführen und damit Erfahrungen sammeln.

Um einerseits die Datenflut zu beschränken und andererseits genügend Messpunkte für die zellenspezifischen Strom- und Leistungskurven zur Verfügung zu haben und im weiteren um mit einer kurzen Messdauer die erheblichen kurzzeitigen Schwankungen der Direktstrahlung nicht in der Messung zu erfassen, entschieden wir uns für eine **Messdauer von 1 Sekunde mit 100 Messpunkten**.

Im Bild 18 ist der Aufbau und das Flussbild der Messeinrichtung ersichtlich. Leider stellte sich heraus, dass der extra beschaffte **150 Watt Inverter** eine zu starke Verzerrung der 230 Volt Wechselspannungs-Kurvenform erzeugt, sodass die Messfühler-Signale mit Störspannungsspitzen überlagert werden, welche die

Messwerte unakzeptierbar fälschen. Für die Messungen musste daher vorläufig auf einen solaren Inselbetrieb verzichtet werden, während aber die Kühlkreislaufpumpe in der Regel von den zwei Solargeneratoren (mit Batteriepufferung) gespeist wurde.

14. Notwendigkeit der Kühlung

Zur Abklärung, ob eine Notwendigkeit zur Kühlung der Solarzellen besteht, liessen wir zeitweise den Absorber ohne Flüssigkeitskühlung frei laufen, worauf sich bei der momentanen Einstrahlung von etwa 930 W/m^2 nach einer Viertelstunde eine Freilauftemperatur von rund 90°C einstellte (Tests 08E23, 39H21 und 40H22).

Diese Temperatur ist für die verwendeten Höchstleistungs-Solarzellen völlig ungefährlich, denn sie sind gemäss Herstellerangaben ohne weiteres bis 120°C einsetzbar. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass bei einer Einstrahlung von 100 Sonnen und $I_n = 700 \text{ W/m}^2$ die berührungslos gemessene Oberflächentemperatur der Si-Zellen etwa 12 Kelvin und der GaAs-Zellen etwa 25 Kelvin höher liegt als deren Rückseitentemperatur ("Zellentemperatur T_z "), die unter der Zelle mit der Arraynummer 19 mit einem Pt 100-Messfühler gemessen wird.

Die effektive Oberflächentemperatur darf mit genügender Sicherheit keinesfalls so hoch steigen, dass sich die Kontaktdrähte ablösen, die mit Lot angelötet wurden, welches einen Schmelzpunkt von 173°C hat.

Der Einfluss der Zellentemperatur auf den Wirkungsgrad geht aus der Auswertung im Vergleich der Tests vom 17.6.94 hervor (Tab. ETATEMP.XLS).

Wir führten unter gleichen Bedingungen je eine Messung mit 112 Sonnen bei etwa 25°C und eine bei etwa 112°C durch:

1. Bei der GaAs-Zelle $7 \times 7 \text{ mm}$ verminderte sich der Wirkungsgrad von 14.4 auf 11.5%; dies entspricht einer Verminderung um 22%.
2. Bei der GaAs-Zelle $\varnothing 7.4 \text{ mm}$ verminderte sich der Wirkungsgrad von 13.9% auf 10.0%, entsprechend einer Verminderung um 28%.

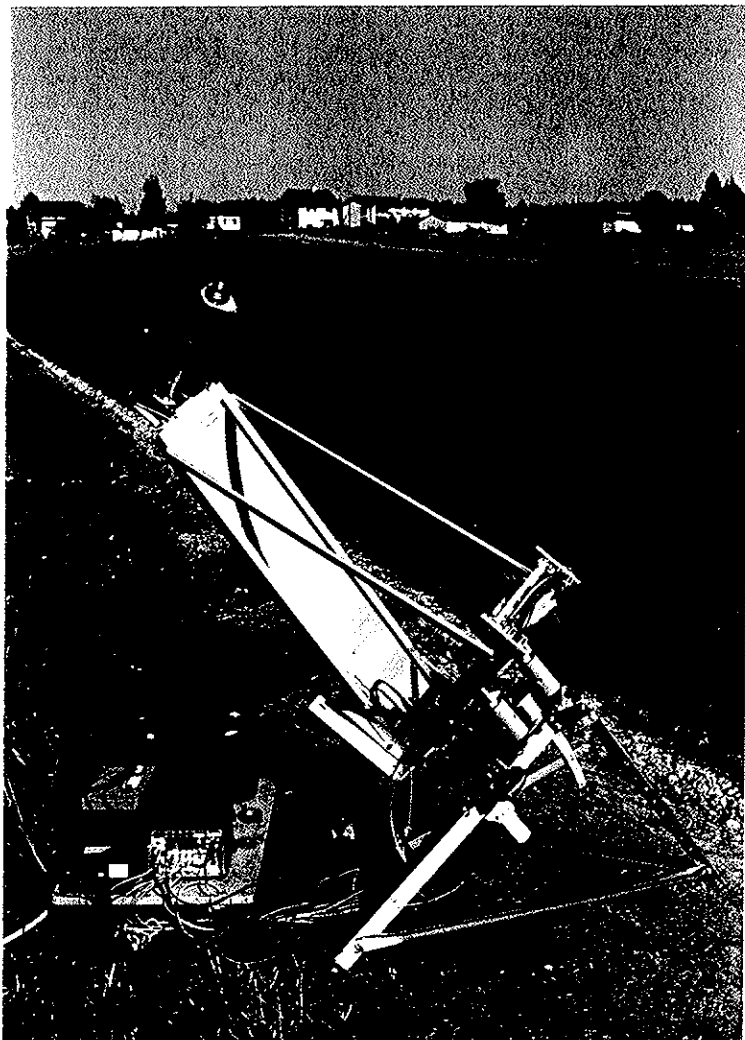


Bild 16: Testanlage im Freien installiert

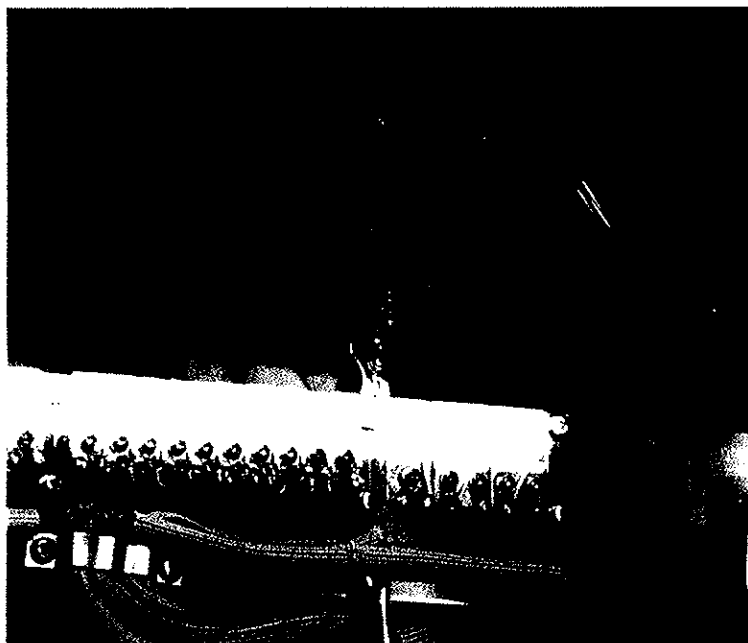


Bild 17: Ausmessung der Strahlungsdichteverteilung



Bild 18: Messung der Zellen-Oberflächentemperatur mit einer Infrarotsonde, im Vergleich mit Musterzelle auf der Absorberrückseite

15. Optimierung der Geometrie für die Herstellung von HELIOFOL II - Fresnelspiegelfolien-Verdichtern

Die DYNASYSTEM AG Bern erarbeitete eine rechnerische Studie [5] über die optische Geometrie des HELIOFOL II-Verdichtersystems (siehe Anhang).

16. Auswertung der Messergebnisse und Berichte erstellen

Sonnenscheibe-Abbild - Diskussion mit Folgerungen (Thyl Steinemann)

Aus Bild 2 und Diagramm 5 in der Studie [5] von H. Steiger geht hervor, dass neben der Sonnenstrahlung, die durch einen einzelnen Spiegel auf die Solarzelle reflektiert wird, ein nicht unwesentlicher Teil der Strahlung infolge der beträchtlichen Divergenz (9.32 mrad) der Sonnenstrahlung neben die Solarzelle reflektiert wird, wenn letztere nicht entsprechend breiter dimensioniert wird. Dieser Divergenzbetrag unterliegt auf der Erde nur kleinen Schwankungen (infolge der leicht elliptischen Erdbahn um die Sonne). Der Durchmesser der Streustrahlung ist aber proportional der Brennweite. Durch **Verkleinerung der Brennweite** verkleinert sich demnach proportional auch die **Streustrahlungsfläche**. Schon aus dieser Sicht ist also anzustreben, die Verdichter und Solarzellen möglichst **breit** und die Brennweite möglichst **kurz** zu dimensionieren. Dafür gibt es noch weitere Gründe, die aus den weiter hinten zu findenden Konzept- und Wirkungsgradstudien ersichtlich sind.

Aus den Messungen (Tabelle SPIEGEL1.XLS) der vier besten Zellen mit den Array-Nrn. 5, 7, 10 und 19 (bei einer Brennweite von etwa 750 mm) ist es allerdings schwierig, quantitativ praktische Schlüsse zu ziehen (z.B. den Verlust zu beziffern), da die Messungen unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden mussten.

Ulrich Leibfried befasste sich in seiner Studie [3] eingehend mit dieser Problematik (s. Anhang).

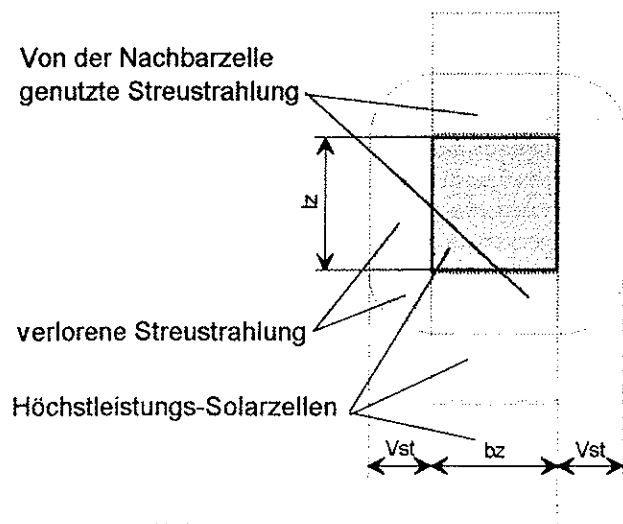


Bild 17

Vergleich des Wirkungsgrades in Abhängigkeit des Verhältnisses Zellenbreite zu Spiegelbreite (Anzahl Sonnen)

Tabelle 1

Array-Nr.	Zellenart	Dimension	Wirkungsgrad an 1 Sonne	Wirkungsgrad mit 1 Spiegel	Wirkungsgrad 10 Spiegel	Wirkungsgrad 112 Spiegel
22	Si- Höchstleistungszelle	10 x 10	17.8% TEST24D4	-	-	14.5% TEST76H25
5	GaAs-Höchstleistungszelle	7 x 7	16.2% TEST07A7	-	-	12.7% TST53E18
19	GaAs-Höchstleistungszelle	7 x 7	12.8% TEST19A19	-	13.9% TEST6M16	12.9% TEST38E3
21	GaAs-Höchstleistungszelle	ø 7.4	12.2% TEST23C4	13.7% TEST5M3	-	13.0% TEST36G3

Die in der obigen Tabelle enthaltenen Wirkungsgradwerte bedürfen der Interpretation mit Einbezug der Art der Wirkungsgradberechnung (bei **einer** Sonne mit der **Globalstrahlung G_n** als Referenz und bei **reflektierter** Strahlung mit der **Direktstrahlung I_n** als Referenz).

Inanbetracht dessen, dass beim HELIOFOL II-System der Anteil der Solarzellenkosten nur etwa 0.5...1.5 % der Gesamtinvestitionskosten beträgt, ist es daher sinnvoll, die Solarzellen so breit zu dimensionieren, dass praktisch **die ganze reflektierte Sonnenstrahlung** auf die Zellen auftrifft, und zwar auch unter Berücksichtigung von mechanischen und thermischen Deformationen der Verdichter, der Solartracker und der Tragstrukturen. (Auf den Faktor der Strahlungsverdichtung hat dies im HELIOFOL II-System keinen Einfluss!)

Von der Sonnenmittlaufsteuerung her sollte es bezüglich der Mittlaufgenauigkeit keine Probleme geben, wie bei den Messungen festgestellt werden konnte. Allerdings muss, wie schon erwähnt, eine **zweiachsige** Mittlaufsteuerung vorausgesetzt werden.

Eine eingehende rechnerische Konzept-, Geometrie- und Wirkungsgradstudie wurde im Unterauftrag durchgeführt von André Waser, HOLOTEC AG Luzern [7]

17. Untersuchung der Möglichkeiten zur Nutzung des Wärmeanteils des von den Solarzellen nicht konvertierbaren Lichtspektrums, eventuell mit Speicherung

Die HTC Solar GmbH Lörrach erarbeitete im Unterauftrag eine Studie [3] zur Konzeption, Anpassung und Optimierung eines geeigneten **Absorbersystems** und der **thermischen Auskopplung** (siehe Anhang). Diese Firma hat auch Konzepte erarbeitet, um Wärme aus Sonnenkollektoren zu speichern und während der Nacht in Elektrizität zurückzuführen. Ein Funktionsmodell wurde an der Heureka 1991 gezeigt. Das Prinzip soll in der zweiten Projektphase im HELIOFOL II-System angewendet und getestet werden.

18. Theoretische Systemvergleiche zur Einordnung des HELIOFOL II - Systems

Silizium-Flachzellenmodule sind auch auf fernere Sicht kaum wesentlich billiger herstellbar als heute. Andere Zellenarten sind wohl im Studium oder im Laborstadium (z.B. die Grätzel- und die Green-Zellen). Wenn jedoch mit dem HELIOFOL II-System durch eine **hundertfache** oder noch höhere **Strahlungsverstärkung** die benötigte Fläche an Höchstleistungs-Solarzellen um einen **Faktor 100** oder mehr **reduziert** werden kann und durch sogenannte "**Kogeneration**" (gleichzeitige fotovoltaische und thermische Nutzung der Sonnenenergie) der Wirkungsgrad im Jahresdurchschnitt **vervierfacht** werden kann, wird dadurch der Gesamtaufwand für die Solarzellen, für die Solartracker, die Tragstrukturen, die elektrischen und hydraulischen Leitungen usw. entsprechend kleiner. Der **Bodenbedarf** beträgt noch etwa **einen Drittel** desjenigen für eine Flachzellenanlage [Mataré 5.3, S.87].

Für einen maximalen System-Erntefaktor entscheidend ist aber nicht nur die Erstinvestition, sondern auch der ganze Aufwand für den Betrieb, den Unterhalt und die schlussendliche Entsorgung der Anlage, der sich wesentlich reduziert, wenn die Anlage **dank eines besseren Wirkungsgrades bedeutend kleiner** dimensioniert werden kann. Der **Systemwirkungsgrad** hat daher einen entscheidenden Einfluss auf die spezifischen Investitions- und Betriebskosten.

Ein entsprechendes Beispiel folgt auf nächster Seite >

Beispiele

für ein fotovoltaisches 1000 kW_{el}-Solarkraftwerk mit fest installierten Flachzellen im Vergleich mit HELIOFOL II-Kraftwerken gleicher Spitzenleistung an zwei verschiedenen Standorten:

Tabelle 2a angenommener Standort der Kraftwerke: Chanso / Wallis

Gegenstand	System >>	Symbol	Flachzellen 1 Sonne	HELIOFOL II 200 Sonnen	HELIOFOL II mit Kogeneration	% von Spalte 1Sonne
Zur Verfügung stehende örtliche Globalstrahlung*		kWh/m ² .a	1'580			-
Zur Verfügung stehende örtliche Direktstrahlung*		kWh/m ² .a	(1'340)	1'340	1'340	100
Notwendige genutzte Strahlungseinfangfläche		m²	8'300	5'600	3'700	45
Zellen ¹ - und Systemwirkungsgrad* (Annahme)		%	16 ¹	27*	40*	250
Kraftwerkwirkungsgrad (Annahme)		%	12	18	27	225
Tages-Ausnutzungsgrad (Annahme)		%	70	100	95	136
Tagesleistung		kWh	3'260	3'620	3'470	106
Jahresleistung		GWh	1.19	1.32	1.27	106
Erstinvestitionsaufwand für die Solarzellenmodule		SFr.	6'040'000	76'000	72'000	12
Aufwand für HELIOFOL II Verdichtersystem		SFr.	-	5'124'000	3'628'000	-
Übriger Erstinvestitionsaufwand		SFr.	100'000	2'000'000	2'500'000	2'500
Total Erstinvestitionsaufwand (ohne Grundstück)		SFr.	7'840'000	7'200'000	6'200'000	79
Spezif. Investitionskosten pro install.el. Leistung		SFr./kW_{el}	7'840	7'200	6'200	79
Kilowattstundenpreis bei 10% Annuität		SFr./kWh	0.66	0.54	0.49	74

Tabelle 2b angenommener Standort der Kraftwerke: Quawairah /Jordanien

Gegenstand	System >>	Symbol	Flachzelle 1 Sonne	HELIOFOL II 200 Sonnen	HELIOFOL II mit Kogeneration	% von Spalte 1Sonne
Zur Verfügung stehende örtliche Globalstrahlung*		kWh/m ² .a	(2'750)	(<geschätzt)		-
Zur Verfügung stehende örtliche Direktstrahlung*		kWh/m ² .a	2'670	2'670	2'670	100
Notwendige genutzte Strahlungseinfangfläche		m²	8'300	5'600	3'700	45
Zellen ¹ - und Systemwirkungsgrad* (Annahme)		%	16 ¹	27*	40*	250
Kraftwerkwirkungsgrad (Annahme)		%	12	18	27	225
Tages-Ausnutzungsgrad (Annahme)		%	70	100	95	136
Tagesleistung		kWh	5'250	7'370	6'940	132
Jahresleistung		GWh	1.92	2.69	2.53	130
Erstinvestitionsaufwand für die Solarzellenmodule		SFr.	6'040'000	76'000	72'000	1.2
Aufwand für HELIOFOL II Verdichtersystem		SFr.	-	5'124'000	3'628'000	-
Übriger Erstinvestitionsaufwand		SFr.	1'800'000	2'000'000	2'500'000	139
Total Erstinvestitionsaufwand (ohne Grundstück)		SFr.	7'840'000	7'200'000	6'200'000	79
Spezif. Investitionskosten pro install.el. Leistung		SFr./kW_{el}	7'840	7'200	6'200	79
Kilowattstundenpreis bei 10% Annuität		SFr./kWh	0.41	0.27	0.25	61

Einstrahlungsdaten nach W.Durisch/Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen/PSI; 13.6.1992/DW51/DC51

19. Vorbereitung der Realisierungsphase

In Vorbereitung der Realisierungsphase wurden einige **theoretische Betrachtungen** über die Messergebnisse am Testkollektor durchgeführt. Infolge der anfangs geschilderten Verzögerungen war es nicht möglich, eine eigentliche Systemoptimierung vorzunehmen. Eine **systematische Optimierung** des HELIOFOL II - Prinzips für die Realisierung eines **Pilotkraftwerkes** kann aufgrund der bisherigen Messungen und aus den nun vorliegenden Erkenntnissen in der nächsten, zweiten Projektphase durchgeführt werden.

Perspektiven für 1995/97

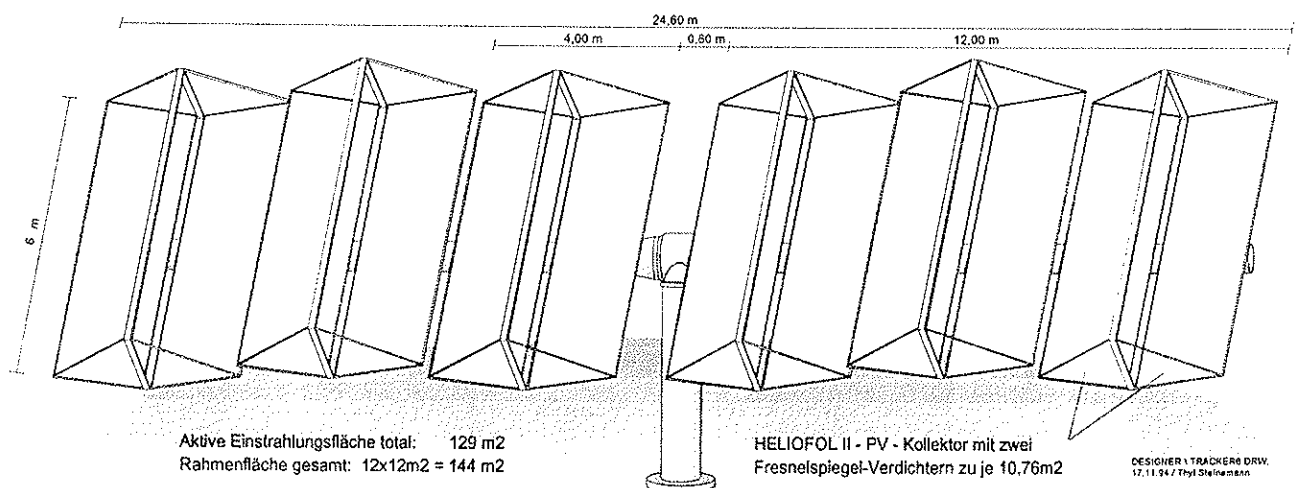
In der 2. Projektphase (Realisation) wird ein **HELIOFOL II - Pilot-Solarkraftwerk** mit Netzeinspeisung gebaut. Dafür werden aufgrund der diesbezüglichen Konzeptstudien [2,5,7] **optisch strukturierte Fresnel-Folienspiegelelemente** konzipiert, in Auftrag gegeben und auf einem **Solartracker** eingebaut. Im weiteren werden wir eine integrierte **Sonnenmitführsteuerung** evaluieren, sowie eine kommunikationsfähige **zentrale Steuerungsanlage**, welche die nötigen Steuerungen, Regelungen und die Überwachung des Pilotkraftwerks übernimmt. Falls keine geeignete Steuerung beschaffbar ist, muss ein entsprechendes Gerät entwickelt werden.

Wir beabsichtigen das HELIOFOL II - Pilot-Solarkraftwerk mit einer **Wärmegewinnungs- und Wärmespeicheranlage** auszurüsten, die in sonnenarmen Tageszeiten und nach Sonnenuntergang Wärmeenergie in elektrischen Strom zurückgenerieren wird. Diesbezügliche Vorbesprechungen mit HTCSolar fanden schon statt.

Unsere bisherigen und neue Kontakte mit Hightech-Solarzellenlabors dürfen erwarten lassen, dass mit einer Entwicklungsbeteiligung in der Höhe von 2 Mio Dollar **Konzentrator-Höchstleistungszellen**, die einen **Wirkungsgrad** um die **30%** aufweisen, in genügender Anzahl in Seriefertigung erhältlich sein werden. Damit werden die Angaben in Tabelle 2, die z.T. noch auf theoretischen Berechnungen und erfahrungsgestützten oder sinngemässen Annahmen beruhen, realisierbar. Solche Solarzellen werden allerdings noch so teuer sein, dass eine grossflächige Anwendung unter direkter Sonne vorläufig nicht infrage kommen kann, was auch der Grund ist, dass bisher noch niemand diese Innovation finanziert hat.

Zum Vergleich: Bei konventionellen Flachzellen-Solaranlagen beträgt der Anteil der Solarzellenkosten etwa 40 bis 60% der Gesamtinvestition, während beim HELIOFOL II - System der Kostenanteil der Höchstleistung-Solarzellen nur etwa **2 % der Gesamtkosten** beträgt.

HELIOFOL II Solartracker-Einheit



Mit einer solchen Kleinkraftwerk-Pilotanlage soll in der 2. Projektphase der Nachweis der technischen Funktionalität und der künftigen Wirtschaftlichkeit der HELIOFOL-Technologie erbracht werden.

Schlussbetrachtung (Kurt Stegmüller)

1. Auswertung der Messergebnisse

Die theoretischen Grundlagen für das HELIOFOL II- System wurden mittlerweile umfassend zusammengestellt [in "Erneuerbare Energien", Prof. Mataré]. Für die Weiterentwicklung von HELIOFOL II kann in Zukunft auf dieses vorzügliche Werk abgestellt werden.

Hier sollen die Messergebnisse zusammengefasst und gewichtet werden. Bei den bisherigen Arbeiten zeigte es sich, dass vor allem die folgenden Faktoren für den Erfolg von HELIOFOL II wesentlich sind:

- Reflektorverluste (s.Anhang [7])
- Kosten / Nutzen-Verhältnis der Nachführung
- Nutzung nur der Direktstrahlung
- Wirkungsgradsteigerung durch Strahlungsverstärkung (Strahlungsverdichtung)
- Thermische Verluste durch hohe Betriebstemperatur der Zellen
- Nutzung der thermischen Komponente (Kogeneration)
- Herstellbarkeit und Genauigkeit des optischen Systems

Der Einfluss all dieser Faktoren wirkt sich beim Resultat aus: Dem Preis der produzierten Energie.

1.1 Reflektorverluste (s. Bericht HoloTec)

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung für das HELIOFOL-System von Dr. Kind [1] basiert auf einer Spiegel-Effizienz von 75 % (Technologie 1992) und 77 % (Technologie 1997). Gemäss Studie HoloTec [7] kann mit einem Gesamt-Reflektorwirkungsgrad von 0.773 gerechnet werden. Der Wert von Dr. Kind wird also voll und ganz bestätigt.

1.2 Kosten / Nutzen-Verhältnis der Nachführung

Der Gewinn durch Nachführung ist bekannt. Eine der Sonne nachgeführte Fläche kann je nach Standort auf der Erde gegenüber der festmontierten Fläche pro Jahr um den Faktor 1.3 bis 3 mehr Energie einfangen.

Ein Solartracker mit zugehöriger Steuerung verteuert ein System gegenüber festmontierten Systemen. Es ist anzunehmen, dass dieser Mehrpreis aber durch den Gewinn mindestens wettgemacht wird. Der Mehrpreis fällt ohnehin nur einmalig auf der Investitionsseite an. Der Gewinn auf der Ertragsseite hingegen fällt über die gesamte Lebensdauer der Anlage an.

1.3 Nutzung nur der Direktstrahlung

Ein optisches System kann systembedingt nur die Direktstrahlung ausnutzen. Das Verhältnis der auf der Erde eintreffenden Energie in Form von Direkt- zu Globalstrahlung variiert stark von Standort zu Standort und mit der Witterung.

Bei den Messungen in Endhöri wurden Verhältnisse (Direkt- zu Globalstrahlung) von 0.9 bis 0.7, im Mittel 0.85 gemessen. Dieses verbessert sich mit zunehmender Höhe. In den Alpen kann mit 0.95 gerechnet werden. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass andere Systeme die globale Strahlung komplett ausnutzen. Festmontierte Solarmodule können auch nur einen Teil davon umwandeln. Es muss hier aber nochmals betont werden, dass Solarsysteme, welche nicht die Globalstrahlung, sondern die Direktstrahlung in sehr hohem Masse nutzen, eben dort besonders sinnvoll eingesetzt werden können, wo die jährliche Direktstrahlung im Durchschnitt hohe Werte erreicht, und da gibt es mehr als genügend Standorte.

1.4 Wirkungsgradsteigerung durch Strahlungsverstärkung (Überlagerung, Konzentration)

Die zu erwartende Wirkungsgradsteigerung für GaAs-Zellen ist in der Publikation [4] wissenschaftlich genau beziffert. Sie beträgt beispielsweise 22 % bei 100 Sonnen anstelle von 17 % der gleichen Zelle bei 1 Sonne (Werte bei 100 °C). In der gleichen Publikation wird auch nachgewiesen, dass ein Optimum dieses Effektes zwischen 80 und 300 Sonnen zu erwarten ist.

Der Effekt konnte messtechnisch nicht nachgewiesen werden, weil keine Möglichkeit besteht, die auf der Zelle auftreffende konzentrierte Strahlung quantitativ und qualitativ zu messen. Geht man von der Darstellung in Kap.16 aus und berücksichtigt, dass der Testkollektor gemäss Studie HoloTec nur einen Wirkungsgrad von 0.387 gegenüber möglichen 0.773 hat, dann sind die unter diesen Voraussetzungen gemessenen

Systemwirkungsgrade beachtlich. Die Fortsetzung der Entwicklung wird zeigen, ob durch die Tests mit dem Prototyp der Projektstufe 2 der praktische Beweis für die theoretischen Berechnungen erbracht werden kann.

1.5 Thermische Verluste durch die hohe Betriebstemperatur der Zellen

Der Leistungsabfall durch die erhöhte Temperatur ist bekannt. Er beträgt gemäss Hersteller unserer GaAs-Zellen $-0.15\%/K$ im Bereich von $20..100\text{ }^{\circ}C$ (entspricht total -12% für den ganzen Bereich). In Publikation [4] wird ein theoretisch zu erwartender Wert von -8% für den gleichen Bereich angegeben. Diese Zahlen würden für Siliziumzellen mehr als doppelt so hoch liegen.

1.6 Nutzung der thermischen Komponente

Bei Strahlungsverdichtung tritt die Verlustwärme auf hohem Niveau im Absorber auf. Im Gegensatz zu Solarpanels bietet sich hier eine Ausnutzung der thermischen Komponente direkt an. Je nach Anwendung kann dies als Prozesswärme direkt erfolgen oder es kann eine weitere Umwandlung nachgeschaltet werden (Kogeneration). Ideal ist ein System, welches den Bereich der Wärmestrahlung (der von den Solarzellen nicht umgewandelt werden kann) bereits vor der Zelle auskoppelt. Man beachte diesbezüglich die Studie [3] von HTCS im Anhang und "Erneuerbare Energien" [4].

1.7 Herstellbarkeit des optischen Systems

Im Bericht [5] hat H. Steiger aufgezeigt, dass die geforderte hohe Präzision bei der Folienherstellung zu Problemen führen kann. Im nächsten Entwicklungsschritt wird die Technologie zur Herstellung der Fresnel-Folienspiegel zu erarbeiten sein. Entsprechende Offerten eines Herstellers liegen vor.

2. Verifizierung der Studie Dr. Kind mit den Messwerten

Aufgrund dieser Darlegungen kann festgestellt werden, dass die Zahlen der "Wirtschaftlichkeitsberechnung" von Dr. Kind [1] in keinem Punkt durch die Messung widerlegt wurden und somit nach wie vor aktuell sind. Im Gegenteil hat Prof.Mataré in in seinem Buch [4] theoretisch und anhand bekannter Publikationen nachgewiesen, dass die Zahlen, die der Studie von Dr. Kind zugrunde gelegt sind, sogar sehr zurückhaltend festgelegt wurden. Somit kann die Schlussfolgerung von Dr. Kind hier verstärkt wiederholt werden:

"Eine Weiterentwicklung der Technologie [von HELIOFOL II] wird dringend empfohlen."

Oder mit den Worten von Prof. Mataré:

"Die Kombination von Konzentrator (Strahlungsverdichter) + Solarzellen + Wärmeausnutzung ist in Bezug auf den Wirkungsgrad jeder einfachen Flachzellen-Anordnung mit Luftkühlung überlegen."

Und unsere Schlussfolgerung lautet (in Anlehnung an Aussagen von Prof.Mataré):

"Nur mit einem die Sonnenstrahlung mittelhoch verdichtenden Prinzip wie dem HELIOFOL II - System kann mit dem heutigen Stand der Technik der wirtschaftliche Durchbruch der Fotovoltaik geschafft werden. Hier braucht nur die Entwicklung des Systems mit Hilfe öffentlicher (oder privater) Mittel unterstützt zu werden."

Symbolverzeichnis

In diesem Bericht verwendete Abkürzungen und Symbole

Sonnenstrahlung	Symbol	Dimension	Bemerkung / Erklärung
Global normal	Gn	W/m ²	Globalstrahlung in Sonnenrichtung gemessen mit Pyranometer CM5 Kipp&Zonen, Serial Nr. 78 44 89 geeicht am 24.10.1989 von Kipp&Zonen (Eichwert: 18.63mV/ KW.m ²).
Direkt normal	In	W/m ²	Direktstrahlung in Sonnenrichtung gemessen mit Pyranometer CM11 Kipp+Zonen, Serial Nr.88 22 51; Abschirmtubus mit Normblende: 400xø40; CM11 geeicht am 26.-28.10.93 vom Weltstrahlungszentrum Davos (Eichwert: 4,37mV/ KW.m ²)
Elektrische Werte			
Leerlaufspannung	Uzo	V	Zellenspannung ohne Belastung gemessen
MPP Spannung	Umpp	V	Zellenspannung bei maximaler Leistung
Kurzschlussstrom	Isc	mA	Zellenstrom bei Kurzschluss an den Anschlüssen
MPP Strom	Impp	mA	Zellenstrom bei maximaler Leistung (im MPP)
MPP Widerstand	Rmpp	Ohm	Belastungswiderstand bei maximaler Leistung
Maximale Leistung	Pmax	mW	Zellenleistung im "maximum power point" (MPP)
Temperaturen			
Umgebung	Tu	°C	Umgebungstemperatur am Schatten gemessen mit LNT-Fühler
Zellenoberfläche	Tzo	°C	manuelle berührungslose Temperaturmessung mit FLUKE Thermo-Handsonde und 4½digit DVM
Unter Zelle Nr.20	Tzu	°C	PT 100- Fühler unter dem Zellenplättchen Nr.20
Absorber	Ta	°C	PT 100- Fühler unter dem Absorber
Wasser	Tw	°C	LNT- Fühler im Wasserbehälter (Kühlkreislauf)
Wirkungsgrad-Varianten			
Spezifische Zellenleistung	Pa	W/cm ²	Direkt:> Pzo = (MPPz/Az*)*(1000/Gn)
Spezifische Zellenleistung	Pa	W/cm ²	> Pzo =(MPPz/Az*)*(1000/In)
Zellenwirkungsgrad 1	ηZ1	%	MPPz / (In*Az); gemessen mit Abschirmtubus
Zellenwirkungsgrad 2	ηZ2	%	MPPz / (Gn*Az); gemessen ohne Abschirmtubus
Systemwirkungsgrad 1	η1	%	MPPz / (In*Lz*Bz*n* (cos25°) *r)
Systemwirkungsgrad 2	η2	%	MPPz / (In*Lz*Bs* (cos25°) *r)
Systemwirkungsgrad 3	η3	%	MPPz / (Gn*Lz*Bs* (cos25°) *r)
Systemwirkungsgrad 4	η4	%	MPPz / (Gn*Lz*Bs*(cos25°))

Literaturverzeichnis

- [1] Kind Richard, Dr.sc.techn., Dipl.Ing.chem.ETH:
"Wirtschaftlichkeitsberechnung für das HELIOFOL II-System", Sept.1992;
Chileweg 4, CH-8474 Dinhard ZH

- [2] Leibfried Ulrich:
"Intensitätsverteilung der konzentrierten Solarstrahlung eines Fix-Paraboloids",
Juni 1993, 17 Seiten,
HTCSolar-Forschungs-GmbH, Industriestr. 8-10, D-79541 Lörrach-Haagen

- [3] Konrad Rolf und Simon Horst:
"Studie zur Konzeption, Anpassung und Optimierung des Receivers"
(für das HELIOFOL II- System), Juni 1993, 17 Seiten,
HTCSolar-Forschungs-GmbH, Industriestr. 8-10, D-79541 Lörrach-Haagen

- [4] Mataré Herbert F. und Faber Peter:
"Erneuerbare Energien"; Erzeugung, Speicherung, Einsatzmöglichkeiten,
1993, 285 Seiten,
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf , ISBN 3-18401183-6
(>> Beste Dokumentation für Fotovoltaik-Experten !)

- [5] Steiger Heinrich, El.Ing.HTL:
"Optimierung der Geometrie für die Herstellung von HELIOFOL II- Fresnel-
Spiegelfolien-Verdichtern";
DYNASYTEM AG, Wylerstrasse 121, CH-3014 Bern

- [6] Steinemann Thyl: Patent A- 4713/80 (HELIOFOL II),
Österreichisches Patentamt Wien 1980

- [7] Waser André, Dipl.El.Ing.:
"Konzeptstudie HELIOFOL II"; 21 Seiten, Juni 1994,
HoloTec AG, Bireggstr.14, CH-6003 Luzern

- [8] M.Berz und S.Merk:
"Diplomarbeit an der HTL Brugg-Windisch über das HELIOFOL-System"
186 Seiten, 12.10.89; Bezugsquelle: KOSMO SYNERGIE AG
Projektleiter: T.Steinemann; Dozent: Prof.H.Faulstroh; Fach: Thermodynamik

- [9] Hilscher Gottfried, Dipl.Ing., Wissenschafts-Journalist:
"Energie im Überfluss - Ergebnisse unkonventionellen Denkens", 222 Seiten
erschienen 1981 im Sponholtz-Verlag, Hameln, ISBN 3877660509

- [10] Dan E.Arvízu and Eldon C.Boes:
"Photovoltaic concentrating systems and components"; 1991 erhalten von:
Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185

Zusammenfassung der Messergebnisse

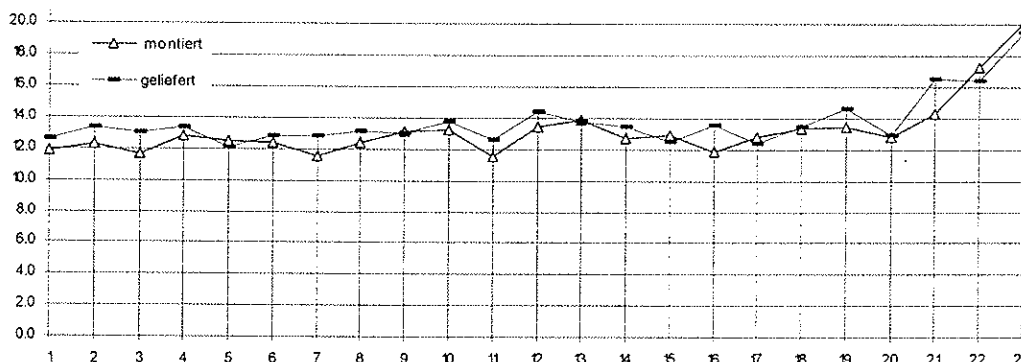
Mit dem 1993 in unserem Atelier angefertigten Prototyp HELIOFOL II/93 mit 112 Oberflächenspiegeln und mit drei verschiedenen Sorten von **Höchstleistungs-Solarzellen** wurden im Labor und an mehreren Sonnentagen im freien Feld umfangreiche Messungen durchgeführt. Insbesondere interessierten uns:

1. Vergleichswerte zwischen dem angelieferten und dem eingebauten Zustand der Zellen
2. der Einfluss des Strahlungseinfallswinkels auf die Zelle
3. der Einfluss verschiedener Strahlungs-Verdichtungs-faktoren
4. die Gleichmässigkeit der Strahlungsdichteverteilung auf der Zellenebene
5. das Temperaturverhalten der Höchstleistungszellen
6. die Gleichgewichtstemperatur der Zellen-Absorbereinheit
7. die Zellenleistungskurve bei fehlerhafter Sonnenmitführung und bei schwacher Einstrahlung
8. die Präzision der Sonnenmitführung und die mechanische Stabilität der Anlage

Im folgenden stellen wir unsere Messergebnisse in inbezug auf die oben aufgeführten Parameter dar.

1. Vergleichswerte zwischen dem angelieferten und dem eingebauten Zustand der Zellen

Wirkungsgrad aller auf dem Absorber montierten Zellen im Vergleich zu deren Wirkungsgrad bei Anlieferung



Erklärung:

Nr. 1...20 sind GaAs-Zellen 7x7mm russischer Provenienz (für 150 Sonnen)

SONNE 0_1.XLS

Nr. 21 ist eine Konzentrazelle GaAs ϕ 7.4 aus USA (Zelle "XX" für 1500 Sonnen)

Nrn. 22, 23 sind Si-Zellen 10x10mm aus USA (Zellen 223, 235 für 300 Sonnen)

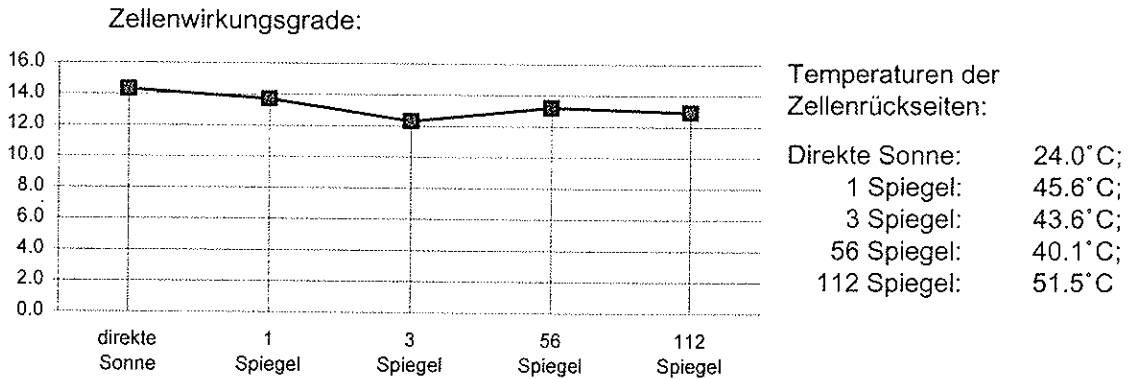
2. Einfluss des Strahlungseinfallswinkels auf die Zelle

- Die Messreihe mit von 5 zu 5 Grad gegen die Sonneneinstrahlung geneigte **Einzelzelle** ergab, dass der Einfluss von schrägem Strahlungseinfall **minim** ist, wenn der Kosinusfaktor einberechnet wird. Man hatte sogar den Eindruck, dass bei schrägem Strahlungseinfall der Zellenwirkungsgrad **höher** wird, offenbar wegen seitlichem Strahlungseintritt in die Schnittkanten. (Herr Kiess/PSI machte uns in einem persönlichen Fachgespräch auf dieses Phänomen aufmerksam, das vor allem bei sehr kleinflächigen Solarzellen auftritt und zuwenig beachtet wird).
- Die Messreihe mit von 5 zu 5 Grad verstellter **Neigung des Absorbers** mit den Solarzellen ergab ein Leistungsmaximum bei einer Winkelstellung von **142.5°** zur **Sonneneinstrahlung** (bei einer festen Verdichterneigung von 25°).

3. Einfluss verschiedener Strahlungs-Verdichtungsfaktoren

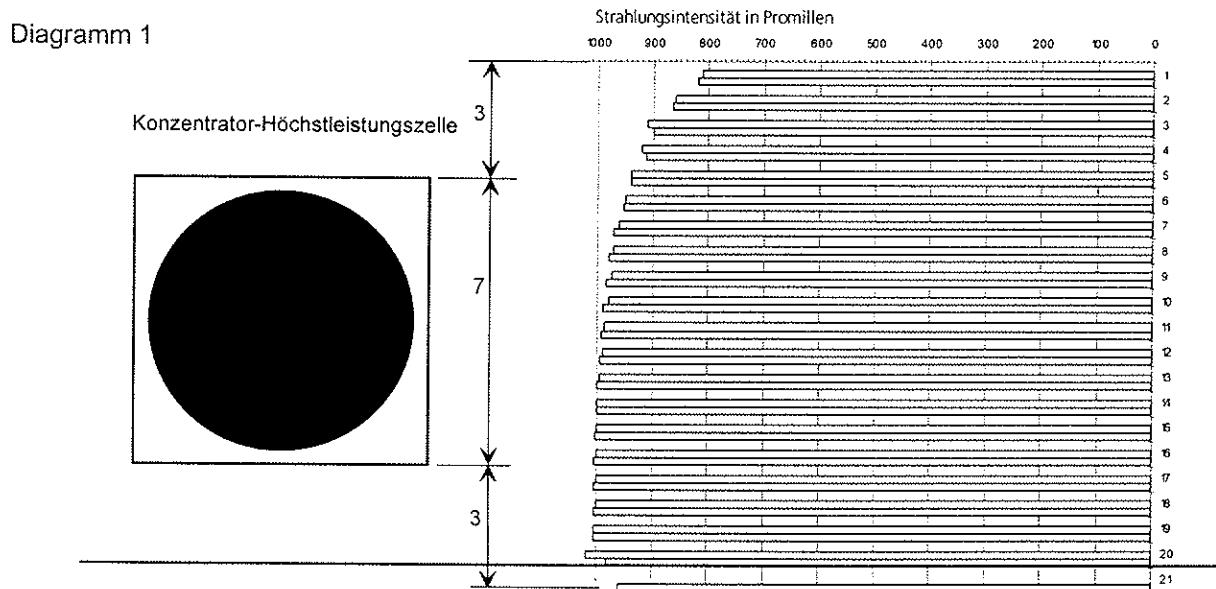
Aus den Angaben im Buch von Prof.Mataré [4] ist zu entnehmen, dass der Wirkungsgrad der Konzentratorzellen mit zunehmender Strahlungsverdichtung steigt. Dies wird durch unsere Messungen nicht eindeutig bestätigt, auch nicht wenn der Temperaturfaktor berücksichtigt wird. Es wären hier wahrscheinlich Messungen im grösseren Massstab notwendig.

Das Diagramm zeigt die Messreihe mit Solarzelle XX (GaAs $\phi 7.4$) an direkter Sonne und mit reflektierter Strahlung durch 1, 3, 56 und 112 Spiegel



4. Gleichmässigkeit der Strahlungsdichteverteilung auf der Zellenebene

Im folgenden Diagramm DENSITY1.XLS werden zwei Messreihen dargestellt, mit den Messwerten eines von Hand quer über die Absorberfläche geführten Spezial-Messfühlers für die Strahlungsdichtemessung.



Die Messebene der Sonde befand sich etwa 2mm über der Zellenflächenebene.

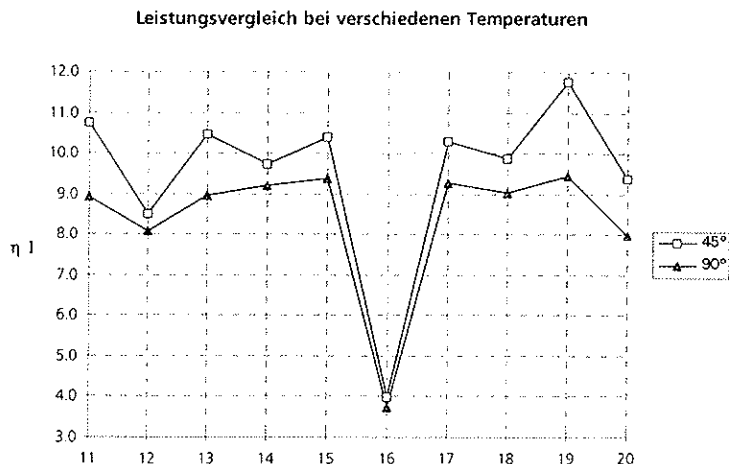
Die geringen Abweichungen der Werte beider Messreihen, die kurz nacheinander durchgeführt wurden, zeigen auf, wie gut reproduzierbar auch Messungen mit handgeführtem Messfühler sein können. Der Messfühler hatte eine Dicke von etwa 3 mm. Direkt auf der Zellenebene dürfte die Strahlungsdichteverteilung noch gleichmässiger und weniger verschoben sein. Aus obiger Darstellung ist die Überstrahlung der (kleinsten) Höchstleistungszelle gut ersichtlich.

5. Temperaturverhalten der Höchstleistungs-Solarzellen

Im nebenstehenden Diagramm haben wir die Messwerte zweier Messreihen mit verschiedenen Zellenrückseiten-Temperaturen dargestellt.

Unter diesen Voraussetzungen betrug der Leistungsverlust der gemessenen Zellen im Durchschnitt 14% bei einer Betriebstemperaturerhöhung von 45° auf 90°C, entsprechend einem negativen Temperaturkoeffizienten von 0.31%. (Nach den Herstellerangaben beträgt der Temperaturkoeffizient 0.15%).

(Die Zelle Nr.16 wurde vorher unbrauchbar).



6. Gleichgewichtstemperatur der Zellen-Absorbereinheit

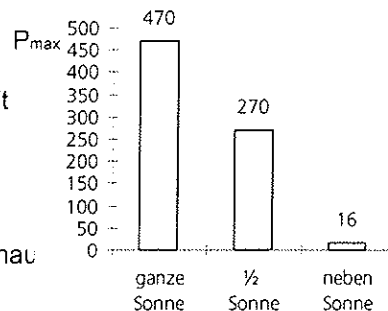
Die Gleichgewichtstemperatur der Zellen-Absorbereinheit ist (ohne aktive Kühlung) in erster Linie von der Stärke der auf die Zellen-Absorbereinheit reflektierten Strahlung abhängig. Am 2.5.94 stellte sich von 12:34 bis 13:14 h bei einer Direktstrahlung von etwa 930 W/m² eine Leerlauftemperatur von 94°C ein.

7. Zellenleistungskurve bei fehlerhafter Sonnenmitführung und bei schwacher Einstrahlung

Am 2.5.94 machten wir über Mittag mit der Zelle 21/XX drei Messungen mit

- exakter Sonnenmitführung
- um eine halbe Sonnenscheibe verschobener Mitführung
- um eine ganze Sonnenscheibe verschobener Mitführung

Aus dem Kurvenverlauf ist ersichtlich, dass die Sonnenmitführung sehr genau sein muss, damit der höchstmögliche Wirkungsgrad der Zelle erreicht wird.



8. Präzision der Sonnenmitführung und die mechanische Stabilität der Anlage

Die elektronische Steuerung führte je nach Sonnenstand den Testkollektor **alle 7 bis 15 Sekunden** exakt mit. Die hohe mechanische Stabilität unserer Anlage ermöglichte, dass die Positionierung der Sonnenmitführung exakt eingehalten wird. Wir haben jedoch festgestellt, dass sich der Kollektor bei Schräglage zunehmend diagonal verziehen kann, sodass die reflektierte Strahlung vom Ziel wegdriftet. Dem wirkten wir entgegen mit einer gewissen Vorspannung der Abstützung, die etwa dreimal täglich korrigiert werden musste. Bei der grösseren Testanlage (auf der Ingenieurschule Brugg-Windisch 1989) lösten wir das Problem mit Diagonalverspannungen aus nichtrostendem Stahldraht.

Schlussbemerkung zu den Messergebnissen

Zusammenfassend können wir mit Befriedigung sagen, dass nach der schlechten Wetterperiode bis in den Frühling 1994 und nach der Einarbeitungszeit mit dem Datenerfassungsprogramm und der gesamten Messeinrichtung während wenigen schönen Tagen alle auf dem Testprogramm stehenden Messungen durchgeführt werden konnten. Beim Aufbau der ganzen Anlage und Messtechnik konnten sehr viele **wertvolle Erfahrungen** gesammelt werden, die hier nicht alle im Einzelnen festgehalten werden können, die aber für die Fortsetzung der Systementwicklung und für den **Bau eines HELIOFOLII-Pilotkraftwerkes** von ausschlaggebender Bedeutung sein werden.

Beschreibung der Testanlage, Schema

Bild Nr.	Gegenstand	Seite
-	Beschreibung der Testanlage HELIOFOL II/93:	
	Lichtverstärkendes HELIOFOL- Spiegelsystem und Höchstleistungs-Solarzellen	1
	Sonnenmitführanlage	1
18	Blockschema Messplatz	2
	Messeinrichtung	2
	Messprogramm	2
	Schema des Messvorganges, der Datenspeicherung und der Datenauswertung	4
19	Zeichnung des Absorbers mit den applizierten Solarzellen	5
20	Zeichnung Prototyp HELIOFOL II/93	6

Beschreibung der Testanlage

1. Lichtverstärkendes HELIOFOL-Spiegelsystem und Höchstleistungs-Solarzellen

In unserem **Prototyp HELIOFOL II/2** wird die Sonneneinstrahlung mit 112 Einzelspiegeln auf eine Reihe von Höchstleistungs-Solarzellen reflektiert und verstärkt durch die spezielle geometrische Anordnung der Spiegel. Dies bewirkt eine weitgehend gleichmässige Leuchtdichte auf den Solarzellen. (Die Leuchtdichte-Verstärkung entspricht etwa 100 Sonnen).

Der Prototyp besteht aus einem **Rahmen** (Innenmass 222 x 1250 mm) mit **112 Oberflächen-Spiegeln** von der Firma Galvolux AG, 6934 Bioggio TI. (Dimension der Spiegel: 9 bis 10 x 220 mm). Eine allfällig notwendige Reinigung der Spiegel muss mit grösster Sorgfalt durchgeführt werden, da deren Oberfläche nur mit einer aufgedampften, hauchdünnen Quarzschicht geschützt ist.

Der Rahmen (und damit die mittlere **Spiegelebene**) ist gegen die Senkrechte zur Sonneneinstrahlung mit 25° geneigt (65° zur Sonnenstrahlung).

Die **Fokaldistanz** von der mittleren Spiegelebene zu den Solarzellen beträgt etwa 750 mm (in der Winkelhalbierenden der gebündelten Einstrahlung).

Die **Solarzellen** sind auf Cu-Plättchen aufgelötet und diese mit einer elektrischen Zwischenisolation wiederum auf die Absorberplatte aufgeschraubt. Auf der Gegenseite der Absorberplatte ist ein Absorber angeschraubt, durch den zur Kühlung oder Temperatur-Konstanthaltung der Solarzellen Wasser geleitet werden kann. Die Solarzellen im Prototyp sind einzeln und in Serie elektrisch verbunden mit einer 4mm- Buchsenleiste. Sie können daher allein durch Umstecken der Messleitung entsprechend in Serie oder Parallel geschaltet und vermessen werden.

Die **Neigung** der Einheit **Absorber / Absorberplatte / Zellen** gegenüber der Sonneneinstrahlung, bzw. gegenüber der Spiegelebene ist verstellbar mit einer 360°- Scheibe.

Für die **Temperaturmessung** am Absorber und unter der 20. Solarzelle sind je ein PT 100-Messfühler eingebaut und deren Anschlüsse für Vierleiteranschluss an die Buchsenleiste geführt.

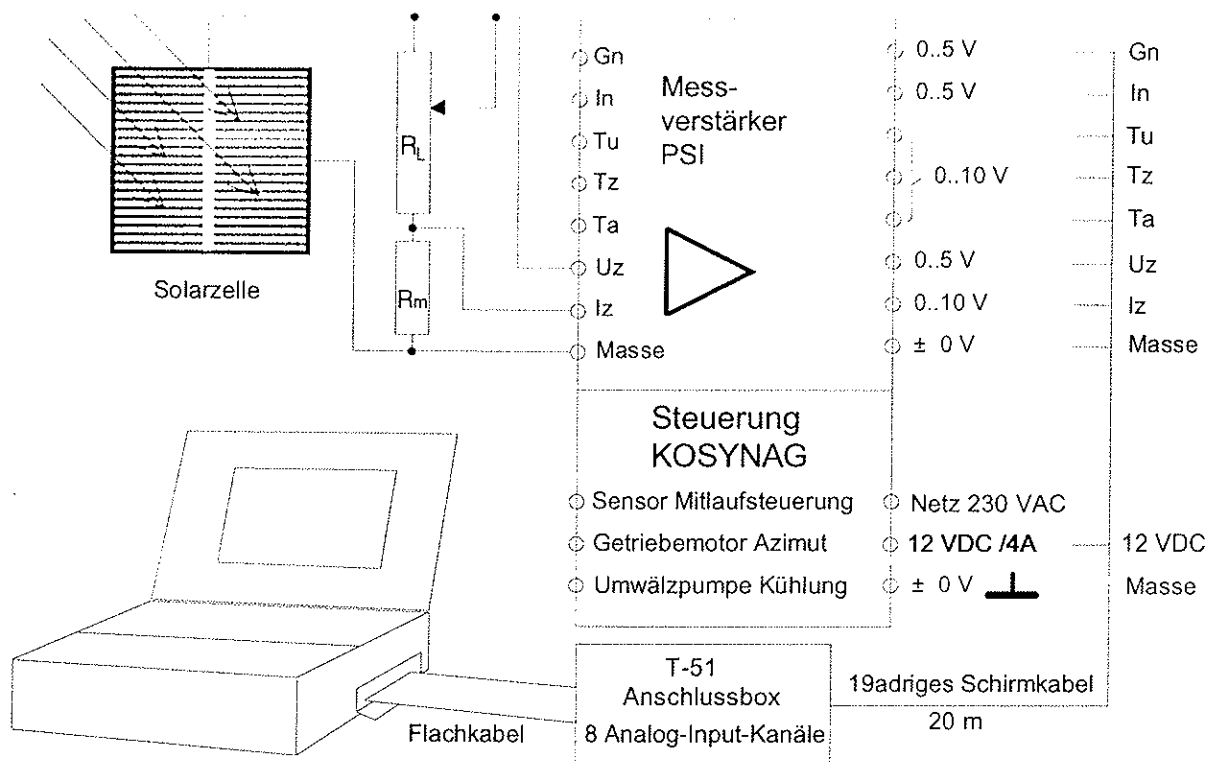
Der Prototyp wird mit Winkeln aus Edelstahl und mit Distanzrohren aus Kunststoff auf der Drehscheibe der **Sonnenmitführeinrichtung** verstellbar festgeschraubt.

2. Sonnen-Mitführanlage

Für die Messungen mit hoher Strahlungsverstärkung (etwa 100 Sonnen) ist eine stabile und sehr exakte **Sonnen-Mitführanlage** unumgängliche Voraussetzung. Infolge der im Mittelland im Winterhalbjahr meist hohen Lufttrübung durch Nebel, Wolken, Kondensstreifen von Düsenflugzeugen und Smog haben wir uns entschlossen, eine eigene Sonnen-Nachführanlage zu bauen, die stabiler, genauer und besser transportabel ist als die Nachführanlage, welche für die Messungen an der Ingenieurschule Brugg-Windisch 1989 verwendet wurde.

Die Anlage ist eine **Dreieckskonstruktion** aus verschraubten Stahlwinkelprofilen mit einem zentralen doppelreihigen, vorgespannten Schulter-Kugellager, das eine **Drehscheibe** trägt, die dadurch parallel zur Erdachse drehbar ist. Die Anlage muss mit Hilfe eines Kompasses oder einer genauen Landkarte exakt in Nord-Südrichtung aufgestellt werden. Die Übereinstimmung der Neigung der Plattform mit der **Erdachse** entsprechend dem geografischen Standort der Anlage ist mittels einer Handspindel anhand einer 1/10°-Skala und einer 1/10°-Libelle einstellbar und mit Schrauben fixierbar.

Die Neigung des auf der Plattform montierten HELIOFOL II- Prototyps entsprechend der jahres- und tageszeitlichen **Deklination** der Sonne wird mit einer zweiten Handspindel eingestellt anhand eines "Miniatur-Sonnenobservatoriums" mit einer Lochoptik, 700 mm langem Tubus und einer Mattscheibe mit Fadenkreuz und Schwenkspiegel mit Lichtblende zur Betrachtung aus verschiedenen Richtungen. Die Anlage kann mittels Handrad oder über die elektrische Steuerung und 12 Volt DC-Getriebemotor manuell zur Sonne ausgerichtet werden. Zudem ist die Anlage mit einer vollautomatischen **elektronischen Nachführsteuerung** mit einem hochempfindlichen **Sonnenstandsensor** ausgerüstet, welche eine sehr hohe Nachführgenauigkeit gewährleistet (1 Impuls etwa alle 8 Sekunden; d.s. 450 Impulse/h und entspricht 2 Winkelminuten pro Impuls).



Rechner Toshiba T- 6600C
mit Messdatenerfassungskarte "Workmate"

Bild 18: Blockschema des Messplatzes

MESSBILD.DRW

3. Messeinrichtung

a. Hardware:

- Rechner: Laptop Toshiba T- 6600 C 66 MHz / 500MB / 10.5" TFT Color LCD (Ozalid AG, Zürich)
- Messkarte: Strawberry Tree / Workmate (Tectron AG, Rosswiesstr.29, 8608 Bubikon ZH)
- Messverstärker: Messbox vom Paul Scherrer Institut, 5332 Villigen PSI, AG
- Steuerung: Manuelle und automatische Nachführsteuerung, Eigenbau von KOSMO SYNERGIE AG

b. Software:

- Messprogramm: "zenOn MEA" von Copa Data GmbH, Ing.Punzenberger, Tannenweg 5, A-5082 Fürstenbrunn
- Datenauswertung: Im Excel 4.0, File: AUSWERT.XLS

Messprogramm

1. Optimierung des Neigungswinkels der Solarzellen

Die maximale Leistung der Solarzellen soll durch **Veränderung des Neigungswinkels** der Montage-Gruppe Absorberplatte /Absorber /Solarzellen gesucht werden.

Leistungskurve aufnehmen für drei Referenz-Zellen (3 Typen) bei jeweils mindestens fünf verschiedenen Stellungen (Differenz etwa 2 Winkelgrade).

2. Erfassung der Leistungsdaten der auf der Absorberplatte montierten Solarzellen (ohne Spiegel) unter direkter Sonne:

- 20 Konzentrazorzellen HTCS-GaAs-49/7x7 mm,
- 1 Konzentrazorzelle ASEC-GaAs-43/ø 7.4mm
- 2 Konzentrazorzellen ASEC-Si-100/9x10 mm

Messbedingungen:

- Die Absorberplatte mit den Zellen wird senkrecht zur Sonne gerichtet, ohne Abschattung der Globalstrahlung; Leistungsberechnung in Bezug auf die gleichzeitig gemessene **Globalstrahlung**; Absorbtemperatur nicht über 45°C

3. Erfassung des Betriebsverhaltens und der Leistungsdaten der Zellen unter etwa 100 Sonnen (mit allen 112 Spiegeln).

Messbedingungen:

- Der Prototyp wird **im Azimut exakt mit der Sonne geführt**. > Die Präzision der Mitführung muss überwacht und die **Rektaszension** vor jeder Messung **justiert** werden.
- Die **Arbeitstemperatur** (angenähert die Temperatur der Absorberplatte) wird in der Regel mittels Flüssigkeitskühlung vorgegeben und in etwa konstantgehalten. Eine **Membranpumpe 12 Volt DC** mit Speisegerät wird in Betrieb gehalten; Wasser aus einem Behälter wird mit der Pumpe kontinuierlich über Schläuche durch den Absorber umgewälzt.
- Die **Leistung** wird in Bezug auf die gleichzeitig gemessene **Direktstrahlung** berechnet.
- Das **Temperaturverhalten** der Zellen* ist etwa bei 25°, 50°, 75° und 95°C zu erfassen. (*die zweiten 10 Konzentratorzellen HTCS-GaAs-49 können gesamthaft in Serie gemessen werden, die Zellen GaAs XX und Si 232 werden einzeln vermessen).
- Die **Zellen-Oberflächentemperatur** wird mit einer **Infrarot-Messsonde** (Fluke 80T- IR) erfasst.
- Zur Erreichung der höheren Temperaturen kann ein thermostatisch geregelter **Tauchsieder** zur Erwärmung des Wasserkreislaufes verwendet oder der Kühlkreislauf stillgelegt werden.

4. Messung der Leuchtdichteverteilung über die Zellenbreite und darüber hinaus

Sie ist auf der Solarzellenebene zu messen mittels speziellem Sensor für hohe Leuchtdichte.

5. Messung des Spiegelwirkungsgrades in Abhängigkeit vom Einfallswinkel

- mit dem äussersten Spiegel
- mit dem Spiegel in der Winkelhalbierenden der Strahlungsverdichtung und
- mit dem innersten Spiegel (alle übrigen 111 Spiegel sind jeweils abzuschatten)
- dasselbe mit je 3 Spiegeln und mit je 10 Spiegeln
- mit zunehmender Anzahl Spiegeln, ausgehend vom Mittelsektor:
 - a. mit 16, 48, 80, 112 Spiegeln; > entspricht: 1/7, 3/7, 5/7, 7/7 der gesamten Spiegelfläche
 - b. mit 28, 56, 84, 112 Spiegeln; > entspricht: 1/4, 1/2, 3/4, 1 der gesamten Spiegelfläche.

6. Messung der Gleichgewichtstemperatur

Messung der Gleichgewichtstemperatur der Absorbereinheit ohne Flüssigkeitskühlung bei voller Sonnenstrahlung (wenn möglich bei annähernd 1000 W/m²).

7. Messung der Leistungskurve bei fehlerhafter Nachführung

Messung der Leistungsveränderung des zweiten 10 - Zellenarrays, wenn die Deklinationsverstellung dejustiert wird mit der Grösse einer halben und einer ganzen Sonnenscheibe, in beiden Richtungen.

8. Messung der Leistungskurve bei schwacher Sonnenstrahlung

Ermittlung der Leistungskurven wie unter Position 4., jedoch bei schwacher Sonnenstrahlung, z.B. kurz nach Sonnenaufgang (etwa 250 W/m²; Absorbtemperatur max. 25°C).

9. Vergleich mit Strahlungsverdichtung mittels durchscheinender linearer Fresnelscheibe

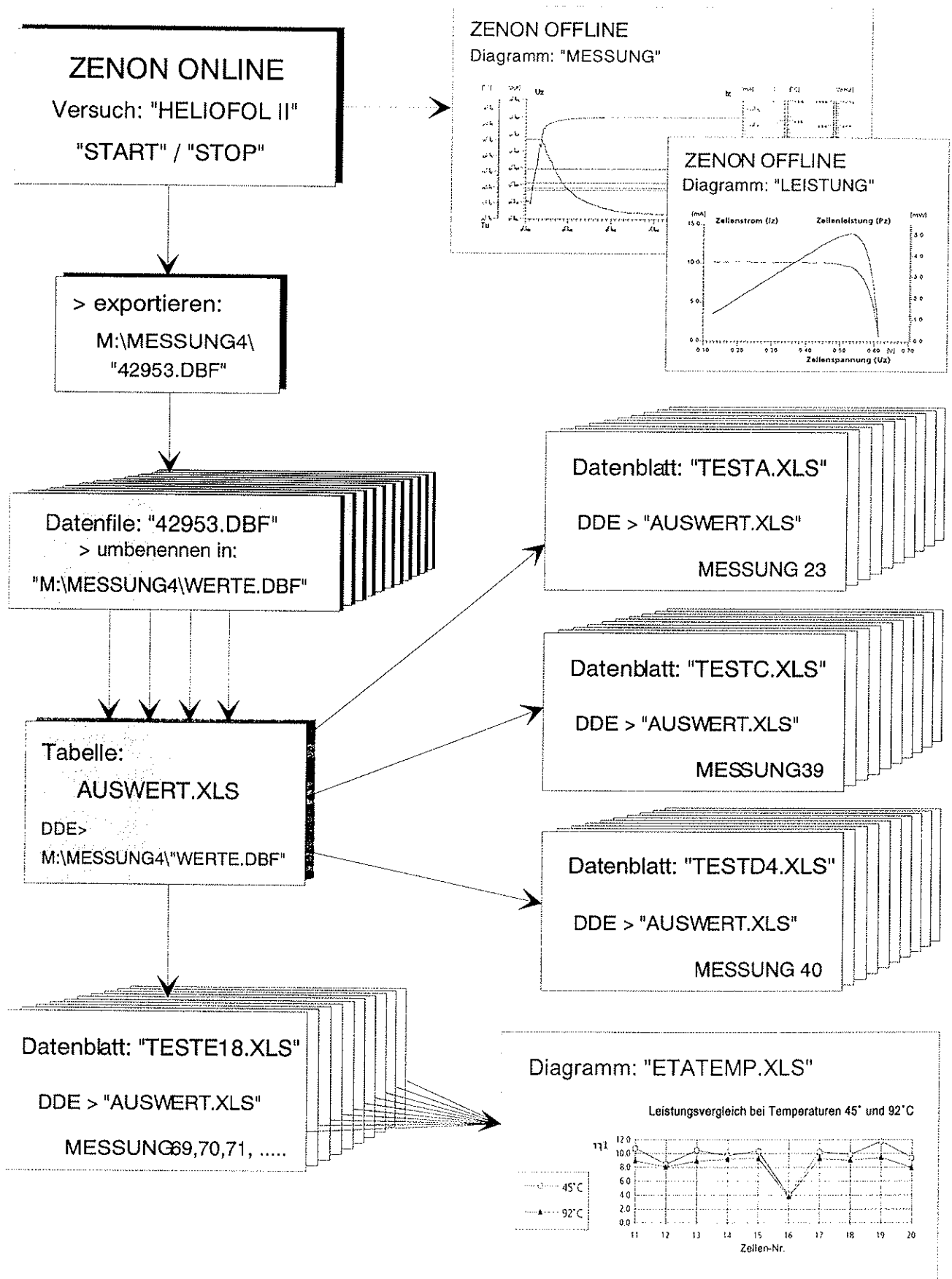
Montage der **Fresnelscheibe** über der Einheit **Absorber / Absorberplatte / Zellen** und Aufnahme der Leistungskurven aller drei Solarzellentypen.

10. Dokumentierung und Auswertung

Auswertung sämtlicher relevanter Messdaten, Erstellung von Tabellen u.vergleichenden Diagrammen.

* * * * *

Messdatenerfassung und Archivierung





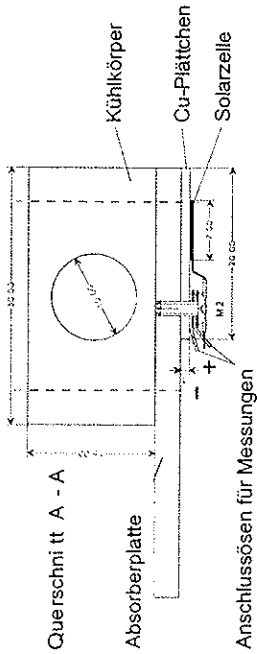
Absorber- Solarzelleneinheit

A+B: je 10 Highpower Solarzellen Typ HTC Solar GaAs-49 / 7 x 7mm (Serieschaltung)

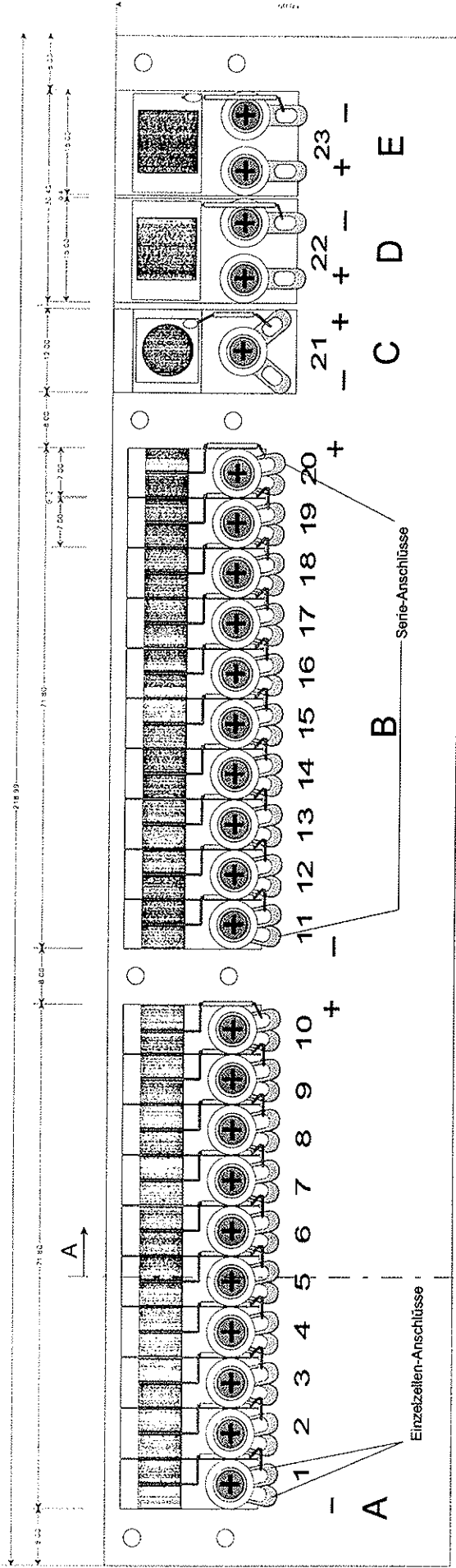
C: 1 Highpower-Konzentratorzelle Typ ASEC GaAs-43 / ø7,4mm

D+E: je 1 Highpower Solarzelle Typ ASEC Si-100/ 10 x 10mm

Temperatursensor PT100 unter der Zelle Nr.20



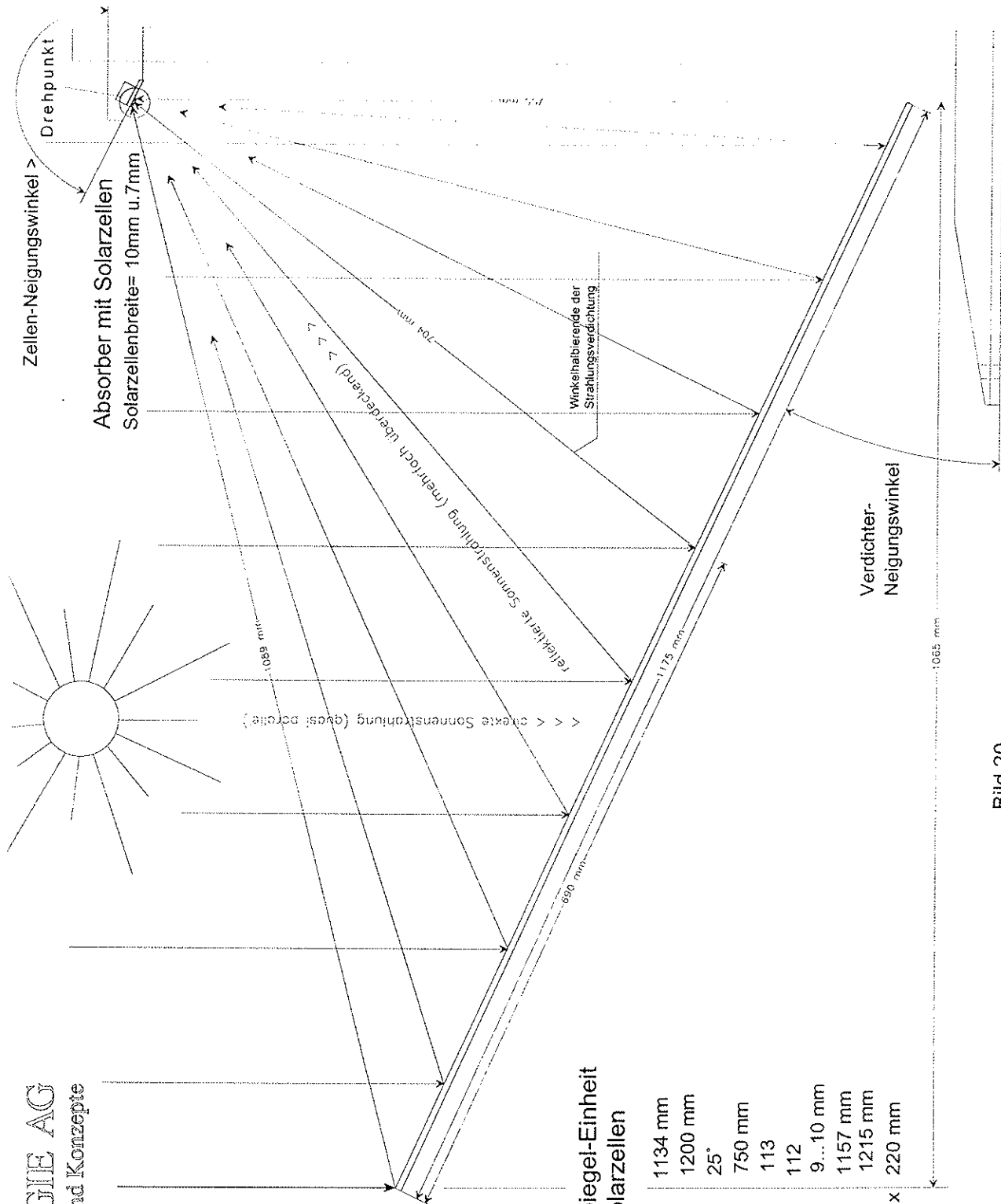
Anschlussösen für Messungen



Ansicht von unten

Bild 19

**Prototyp
 HELIOFOL II
 Version 13
 Auftrag BEW93**



**Geometrie der Verdichterspiegel-Einheit
 mit Absorbersystem + Solarzellen**

Strahlungsoffnungsweite [y]	1134 mm
Aktive Verdichterbreite [a]	1200 mm
Verdichter-Neigungswinkel [h]	25°
Mittlere Fokaldistanz [f]	750 mm
Verdichtungsfaktor (theor.) [C]	113
Anzahl Spiegel	112
Spiegelbreite	9...10 mm
Rahmen-Innenmass	1157 mm
Rahmen-Aussenmass	1215 mm
Spiegelfläche	1134 x 220 mm