

Der Satz und Druck dieser Arbeit erfolgte mit **WISO PERFECT 3.1**. Alle Abbildungen bis auf die Abbildungen 9 und 19 habe ich mit dem Zeichenprogramm **SKETCH** und dem Datenanalyseprogramm **MULTIGRAPH** selbst erstellt.

## Aufbau einer Meßtechnik zur Messung von Mehrfachsolarzellen

Diplomarbeit im Fach Physik  
am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme  
im Einvernehmen mit der Albert-Ludwigs Universität Freiburg

vorgelegt von

Bernd Müller-Bierl

Freiburg, August 1991

Der Satz und Druck dieser Arbeit erfolgte mit WORD PERFECT 5.1. Alle Abbildungen bis auf die Abbildungen 9 und 19 habe ich mit dem Zeichenprogramm SKETCH und dem Datenanalyseprogramm MULTIGRAPH selbst erstellt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Physikalisches Verhalten und energetische Bewertung von Solarzellen mit einem oder mehreren Übergängen unter realistischen Benutzungsbedingungen" war die Aufgabenstellung gegeben, eine Messtechnik für Solarzellen mit mehreren p-n-Übergängen, sogenannte "Mehrfachsolarzellen", zu entwickeln. Dieses Forschungsvorhaben baut auf Apparaturen und Verfahren des vorangegangenen Vorhabens "Kalibrierung und Diagnostik von großflächigen Solarzellenmodulen" auf. Ein Ziel ist die Möglichkeit der Wirkungsgradbestimmung von Solarzellen aller Art mit hoher Genauigkeit [1]. Für den Aufbau des Mesplatzes für Mehrfachsolarzellen waren ein 20 Jahre alter Zeconsolarzellenstator sowie eine optische Bank vorhanden. Die Aufgabe hat in der Wahl des geeigneten Messverfahrens bestanden sowie dem Aufbau einer Apparatur, die nach Abschluß des Forschungsvorhabens als Messmessplatz für Mehrfachsolarzellen eingesetzt werden soll. In dieser Arbeit berichte ich über die Erfolge dieses Teilvorhabens und gebe einen Ausblick auf die weiteren Schritte, die von Aussehen der Apparatur als Messmessplatz notwendig sind. Teils der Theorie wurde auf der 10. Europäischen Photovoltaischen Konferenz in Lissabon, (1990) von Herrn Dr. Klaus Heidler und mir veröffentlicht [2]. Ich danke Herrn Prof. Dr. A. Festschberger für die Vergabe der Arbeit an seinem Institut, Herrn Dr. K. Heidler und Herrn Dr. V. Wittwer für die Betreuung der Arbeit, Herrn Prof. Dr. V. Kettling für die erste Mehrfachsolarzelle, die am Institut hergestellt wurde, Herrn Prof. Dr. J. Metzner für die Beschäftigung des Praktikantenlebens der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und Herrn Prof. Dr. J. Kasperkang für einen entscheidenden Hinweis zur Versuchsanordnung. Herrn Dipl. Phys. A. Schmecker danke ich für Messungen mit seinem Fourier-Spektrometer. Frau Dipl. Phys. A. Salen, Frau Dipl. Phys. J. Seier und Herrn Dipl.-Ing. S. Kuntze danke ich für wertvolle Hinweise zur Datenanalyse und zur Messtechnik. Frau A. Böhmer danke ich für die Aufnahme der Farbphotos unter schwierigen Lichtverhältnissen. Besonderen Dank an Frau C. Göttinger für die Korrektur des Manuskripts. Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie unter Vertikalganzenummer 032-8650E unterstützt.

Freiburg/ Breisgau, August 1991



## Vorwort

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Physikalisches Verhalten und energetische Bewertung von Solarzellen mit einem oder mehreren Übergängen unter realistischen Bezugsbedingungen" war die Aufgabenstellung gegeben, eine Meßtechnik für Solarzellen mit mehreren p-n Übergängen, sogenannte "Mehrfachsolarzellen", zu entwickeln. Dieses Forschungsvorhaben baut auf Apparaturen und Verfahren des vorangegangenen Vorhabens "Kalibrierung und Diagnostik von großflächigen Solarelementen" auf. Ein Ziel ist die Möglichkeit der Wirkungsgradbestimmung von Solarzellen aller Art mit hoher Genauigkeit /1/. Für den Aufbau des Meßplatzes für Mehrfachsolarellen waren ein 20 Jahre alter Xenonsolarsimulator sowie eine optische Bank vorhanden. Die Aufgabe hat in der Wahl des geeigneten Meßverfahrens bestanden sowie dem Aufbau einer Apparatur, die nach Abschluß des Forschungsvorhabens als Routinemeßplatz für Mehrfachsolarzellen eingesetzt werden soll. In dieser Arbeit berichte ich über die Erfolge dieses Teilvorhabens und gebe einen Ausblick auf die weiteren Schritte, die zum Ausbau der Apparatur als Routinemeßplatz notwendig sind. Teile der Theorie wurden auf der 10. Europäischen Photovoltaischen Konferenz in Lissabon, (1990) von Herrn Dr.Klaus Heidler und mir veröffentlicht /2/. Ich danke Herrn Prof.Dr. A.Goetzberger für die Vergabe der Arbeit an seinem Institut, Herrn Dr. K.Heidler und Herrn Dr. V.Wittwer für die Betreuung der Arbeit, Herrn Prof.Dr. W.Wettling für die erste Mehrfachsolarzelle, die am Institut hergestellt wurde, Herrn Prof.Dr. J.Metzdorf für die Besichtigung des Primärkalibrierlabors der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und Herrn Prof.Dr. J.Honerkamp für einen entscheidenden Hinweis zur Versuchsplanung. Herrn Dipl.Phys. A.Schönecker danke ich für Messungen mit seinem Fourierspektrometer. Frau Dipl.Phys. A.Raicu, Frau Dipl.Phys. J.Beier und Herrn Dipl.Ing. S.Kunzelmann danke ich für wertvolle Hinweise zur Datenanalyse und zur Meßtechnik. Frau A.Defner danke ich für die Aufnahme der Farbphotos unter schwierigen Lichtverhältnissen. Besonderen Dank an Frau C.Güttler für die Korrektur des Manuskripts. Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie unter Vertragsnummer 032-8650E unterstützt.

Freiburg/ Umkirch, August 1991

Keine Theorie stimmt jemals mit allen Tatsachen  
auf ihrem Gebiet überein, doch liegt der Fehler  
nicht immer bei der Theorie.

Paul Feyerabend,  
Vider des Heiligungswang

## Inhaltsverzeichnis:

I. Einleitung	1
II. Übersicht der Messtechnik	2
1. Standardmessbedingungen	3
2. Bekannte Verfahren zur Messung von Mehrfachsolarzellen unter Standardmessbedingungen	4
3.1. Keine Theorie stimmt jeweils mit allen Tatsachen auf ihrem Gebiet überein, doch liegt der Fehler nicht immer bei der Theorie.	10
3.2. Methoden zur Messung der spektralen Empfindlichkeiten	12
3.2.1. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeit der strombegrenzenden Zelle	13
3.2.2. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeit aller Zellen	13
3.2.3. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeiten und Bestrahlungsströme	13
3.3. Referenzzellenmethoden	14
3.3.1. Methode der spektralen Fehlanpassung angewandt auf die strombegrenzende Zelle	14
3.3.2. Übereinstimmende Referenzzellen	16
3.3.3. Die Methode der selbstkonsistenten Verteilungen	16
III. Material und Methoden	17
1. Anwendung der Methode der selbstkonsistenten Verteilungen in der Solarisolation für Mehrfachsolarzellen	17
2. Kopplung der Messtechnik an physikalischen Einheiten: Referenzelemente zur Apparatur	22
3. Messung und Beurteilung einer räumlichen Intensitätsverteilung	23

#### 4. Goldschnitt-Versuchsplan:

### Inhaltsverzeichnis:

des Punktes maximaler Leistung	28
I. Grundbegriffe: Die Solarzelle und ihre Kenngrößen	1
Kurzschluss-Solarzelle mit veränderbarem Spektrum	33
1. Der beleuchtete p-n Übergang	1
2. Die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle	4
3. Mehrfachsolarzellen	5
II. Übersicht der Meßtechnik	6
1. Standardbezugsbedingungen	6
2. Bekannte Verfahren zur Messung von Mehrfachsolarzellen unter Standardbezugsbedingungen	9
2.1. Die "Methode der besten Anpassung"	10
2.2. Methoden absolut bekannter spektraler Empfindlichkeiten	12
2.2.1. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeit der strombegrenzenden Teilzelle	12
2.2.2. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeit aller Teilzellen	13
2.2.3. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeiten und Bestrahlungsstärken	13
2.3. Referenzzellenmethoden	14
2.3.1. Methode der spektralen Fehlanpassung angewandt auf die strombegrenzende Teilzelle	14
2.3.2. Übereinstimmende Referenzzellen	15
2.3.3. Die Methode der selbstkonsistenten Verteilungen	16
III. Material und Methode	17
1. Anwendung der Methode der selbstkonsistenten Verteilungen in der Solarsimulation für Mehrfachsolarzellen	17
2. Kopplung der Meßtechnik an physikalischen Einheiten: Referenzelemente zur Apparatur	22
3. Messung und Beurteilung einer räumlichen Intensitätsverteilung	22



4. Goldschnitt-Versuchsplan: Experimenteller Versuchsplan zur Bestimmung des Punktes maximaler Leistung	29
5. Beschreibung der Apparatur: Mehrquellen-Solarsimulator mit variierbarem Spektrum	33
5.1. Mechanischer und elektrischer Aufbau	33
5.2. Lampen und Optik	38
6. Messung der spektralen Verteilung in der Testebene des Solarsimulators	51
6.1. Spektralradiometer	51
6.2. Gefilterte Solarzellen	52
7. Testobjekt: GaAs/m-Si Mehrfachsolarzelle	55
IV. Diskussion	58
1. Vorteile der Methode der selbstkonsistenten Verteilungen	58
2. Spezielle Probleme der Meßtechnik an Mehrfachsolarzellen	59
3. Überlegungen zu Meßunsicherheiten	60
4. Weitere Schritte zum Aufbau der Apparatur	62
V. Zusammenfassung	63
Ergänzende Materialien:	
A Photos zur Apparatur	64
B Spiegel- und Spektrenkatalog	67
C Rechnen mit spektralen Verteilungen und Statistik	71
D Schaltplan zur Umschalteinheit	73
E Meßprogrammbeschreibung Version 1.0	74
F Inhaltsverzeichnis der Diskette zur Diplomarbeit	75
Literaturverzeichnis	76



## 1. Grundbegriffe: Die Solarzelle und ihre Kenngrößen

### 1. Der betrachtete p-n Übergang

Betrachten wir folgendes Gedankenexperiment: Ein p-dotiertes Stück Halbleiter wird mit einem n-dotierten Stück Halbleiter zusammengebracht. Die Elektronen in n-Material werden in Richtung abnehmender Konzentration abwandern (Diffusion). Dasselbe gilt für die Löcher im p-Material<sup>1</sup>. Sind Elektronen ins p-Material gewandert, erzeugen sie dort ein Ladungsungleichgewicht. Die Umverteilung der Ladung führt zu einem elektrostatischen Feld, das den durch Diffusion erzeugten Strom entgegenwirkt. Ein Gleichgewichtszustand stellt sich ein. Der Gleichgewichtszustand wird durch die Fermienergie des p-n Übergangs bestimmt. Ein System im thermischen Gleichgewicht besitzt nur eine Fermienergie. Entfernt von der Verbindungsstelle zwischen p- und n-Material wird man von den isolierten Halbleitermaterialien ununterscheidbare Bedingungen vermuten. In der Nähe der Verbindungsstelle liegt demnach ein Übergangsbereich, in dem ein Potentialunterschied  $\psi_0$  auftritt. Der Übergangsbereich heißt die Raumladungsgrenzschicht des p-n Übergangs<sup>2</sup>. Der Potentialunterschied ist durch die Dotierung des p- mit n-Materials gegeben<sup>3</sup>. Legt man außerdem eine elektrische Spannung an, verhält sich diese zu dem Potentialunterschied  $\psi_0$ .

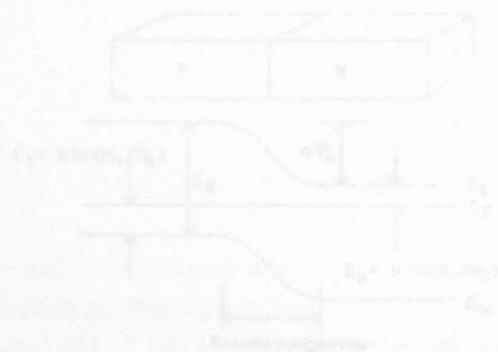


Abbildung 1: Raumladungsgrenzschicht des p-n Übergangs

<sup>1</sup> Das Bild ist in Elektronen und Löchern symmetrisch.

<sup>2</sup> Siehe Abbildung 1:  $N_A$  ist die Anzahl der Akzeptoren,  $N_D$  ist die Anzahl der Donatoren,  $N_p$  ist die Zustandsdichte im Valenzband und  $N_D$  ist die Zustandsdichte im Leitungsband.

<sup>3</sup> Eine ausführliche Darstellung der Raumladungsgrenzschicht in beladeten und unbeladenen Fall mit und ohne außen angelegte Spannung findet man in L.P. Hunter, Handbook of Semiconductor Electronics, Mc Graw Hill New York, (1962).

## I. Grundbegriffe: Die Solarzelle und ihre Kenngrößen

### 1. Der beleuchtete p-n Übergang

Betrachten wir folgendes Gedankenexperiment: Ein p-dotiertes Stück Halbleiter wird mit einem n-dotiertem Stück Halbleiter zusammengebracht. Die Elektronen im n-Material werden in Richtung abnehmender Konzentration abwandern (Diffusion). Dasselbe gilt für die Löcher im p-Material<sup>1</sup>. Sind Elektronen ins p-Material gewandert, erzeugen sie dort ein Ladungsungleichgewicht. Die Umverteilung der Ladung führt zu einem elektrostatischen Feld, das dem durch Diffusion erzeugten Strom entgegenwirkt. Ein Gleichgewichtszustand stellt sich ein. Der Gleichgewichtszustand wird durch die Fermienergie des p-n Übergangs bestimmt. Ein System im thermischen Gleichgewicht besitzt nur eine Fermienergie. Entfernt von der Verbindungsstelle zwischen p- und n-Material wird man von den isolierten Halbleitermaterialien ununterscheidbare Bedingungen vermuten. In der Nähe der Verbindungsstelle liegt demnach ein Übergangsbereich, in dem ein Potentialunterschied  $\psi_0$  auftritt. Der Übergangsbereich heißt die Raumladungszone des p-n Übergangs [3]. Der Potentialunterschied ist durch die Dotierung des p- und n-Materials gegeben<sup>2</sup>. Legt man außerdem eine elektrische Spannung an, so addiert sich diese zu dem Potentialunterschied  $\psi_0$ <sup>3</sup>.

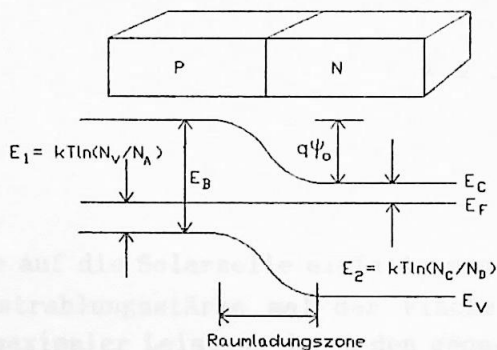


Abbildung 1: Bändermodell zum p-n Übergang

<sup>1</sup> Das Bild ist in Elektronen und Löchern symmetrisch.

<sup>2</sup> Siehe Abbildung 1:  $N_A$  ist die Anzahl der Akzeptoren,  $N_D$  ist die Anzahl der Donatoren,  $N_V$  ist die Zustandsdichte im Valenzband und  $N_C$  ist die Zustandsdichte im Leitungsband.

<sup>3</sup> Eine ausführliche Darstellung des Bändermodells im beleuchteten und unbeleuchteten Fall mit und ohne außen angelegte Spannung findet man in L.P. Hunter, Handbook of Semiconductor Electronics, Mc Graw Hill New York, (1962)

Für direkte Halbleiter (z.B. GaAs) führt der Einfall eines Lichtquants direkt zur Erzeugung eines Elektron-Loch Paares. Für indirekte Halbleiter (z.B. Si) muß für diesen Prozeß außerdem noch ein Quasiimpuls mit dem Kristallgitter ausgetauscht werden; die Wahrscheinlichkeit für den Erzeugungsprozeß ist entsprechend geringer. In der Raumladungszone werden Elektron-Loch Paare durch das elektrostatische Feld getrennt und führen so zu einem Photostrom  $I$ . Dem Photostrom eines p-n Halbleiters unter Beleuchtung ist seine Strom-Spannungscharakteristik, die durch die Shockley Gleichung beschrieben wird /4/, überlagert<sup>1</sup>. Für die Strom-Spannungscharakteristik einer Solarzelle in Vorwärtsrichtung erhält man in guter Näherung /5/:

$$I(V) = (I_0 e^{\frac{qV}{kT}} - 1) - I_{sc} \quad (1)$$

mit der Elementarladung  $q$ , der Boltzmannkonstanten  $k$ , der Temperatur  $T$  und dem Diodensättigungsstrom  $I_0$ . Dies ist die Shockley-Gleichung, erweitert um den Photostrom  $I_{sc}$ . Das Vorzeichen zeigt an, daß die Diodenkennlinie um den Photostrom abgesenkt wird. Die Leistung der Solarzelle erhält man, indem man an jedem Punkt der Kennlinie den Strom mit der zugehörigen Spannung multipliziert. Den Punkt maximaler Leistung findet man dann als Maximum der so definierten Funktion. Der Wirkungsgrad der Solarzelle läßt sich angeben als:

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_{In}} \quad (2)$$

mit der auf die Solarzelle einfallenden Leistung  $P_{In} = E_{tot} A$ , der einfallenden Bestrahlungsstärke mal der Fläche der Solarzelle. Es ist üblich, den Punkt maximaler Leistung durch den geometrisch anschaulichen Füllfaktor FF zu parametrisieren. Der Füllfaktor bezeichnet das Verhältnis der Fläche eines durch den  $P_{Max}$  und den Ursprung gegebenen Quadrates (auch Quadrat der maximalen Leistung genannt, eingezeichnet in Abbildung 3) zu der Fläche eines Quadrates durch den Punkt  $(V_{oc}, I_{sc})$ :

$$FF = \frac{P_{Max}}{I_{sc} V_{oc}}$$

---

<sup>1</sup> Zu den Grundlagen der Festkörperphysik und zur Physik der Solarzelle möchte ich insbesondere auf N.W.Ashcroft, N.D.Mermin, Solid State Physics, HRW internat.ed. (1987) und A.F.Fahrenbruch, R.H.Bube, Fundamentals of Solar Cells, Academic Press New York London, (1983) hinweisen.

Der Füllfaktor  $FF$  ist somit ein Maß für die Abweichung der Kennlinienkrümmung vom rechten Winkel. Der Wirkungsgrad der Solarzelle lässt sich damit schreiben als:

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{A E_{tot}} \quad (4)$$

$FF$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  und  $P_{max}$  werden als Kennlinienparameter<sup>1</sup> bezeichnet /6/.

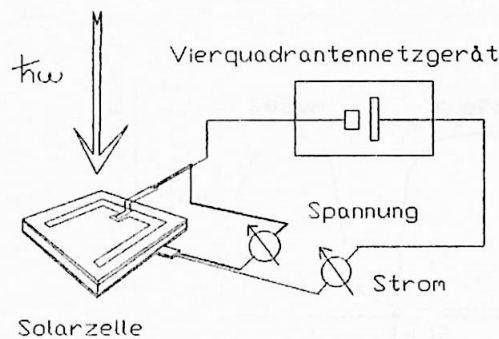


Abbildung 2: Kennlinienmessung an einer Solarzelle

Durch die Oberflächenrekombination der Elektron-Loch Paare sinkt die spektrale Empfindlichkeit des Siliziums zu höheren Energien hin wieder ab. Die gestrichelte Kurve zeigt die spektrale Empfindlichkeit für Silizium. Alle Photonen mit Energie oberhalb der Bandlücke von Silizium führen zur Erzeugung von Photostrom. Der Vergleich des klassischen Photoeffekt /7/ mit dem photovoltaischen Effekt

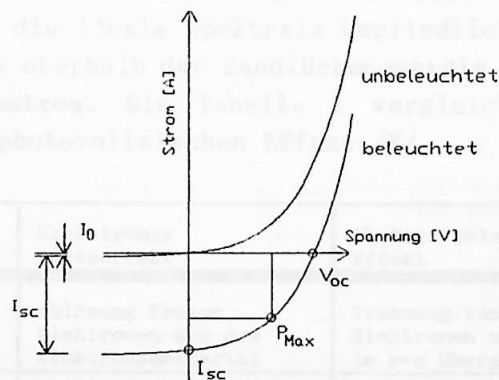


Abbildung 3: Hell- und Dunkelkennlinie einer Solarzelle

<sup>1</sup> Auch: Solarzellenparameter.



## 2. Die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle

Wird Licht in den p-n Übergang eingestrahlt, so fließt in der Solarzelle ein Photostrom. Die Größe des Stroms hängt nicht nur von der Intensität des eingestrahlt Lichts, sondern auch von dessen Wellenlänge ab. Die Abhängigkeit des Photostroms von der Wellenlänge des eingestrahlt Lichts wird durch die "spektrale Empfindlichkeit" der Solarzelle beschrieben. Die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle ist definiert als die Anzahl freier Ladungsträger die pro einfallendem Photon und Wellenlänge erzeugt werden. Abbildung 4 zeigt schematisch die spektrale Empfindlichkeit einer Silizium-Solarzelle bei  $300^\circ\text{K}$  und  $10^6 \text{ cm/s}$  Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit im Vergleich mit dem Verhältnis des Photostroms, welcher in einer Kupferkathode durch den klassischen Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt) verursacht wird, zum Sättigungsstrom für eine willkürliche Lichtintensität.

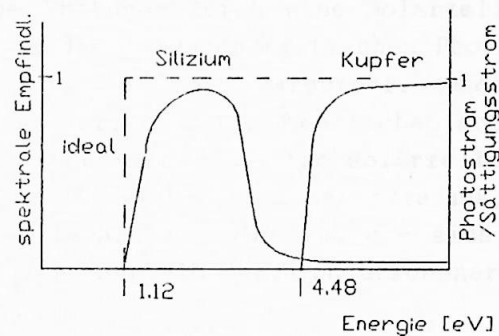


Abbildung 4: spektrale Antwortfunktionen

Durch die Oberflächenrekombination der Elektron-Loch Paare nimmt die spektrale Empfindlichkeit des Siliziums zu höheren Energien hin wieder ab. Die gestrichelte Kurve zeigt die ideale spektrale Empfindlichkeit für Silizium: Alle Photonen mit Energie oberhalb der Bandlückenenergie von Silizium führen zur Erzeugung von Photostrom. Die Tabelle 1 vergleicht den klassischen Photoeffekt /7/ mit dem photovoltaischen Effekt /8/.

	Klassischer Photoeffekt	Photovoltaischer Effekt
Effekt	Ablösung freier Elektronen aus dem Elektrodenmaterial	Trennung von Elektronen und Löchern im p-n Übergang
Charakteristische Energie	Austrittsarbeit des Elektrodenmaterials	Größe der Bandlücke im Festkörper
Quantitative Nachweismethode	Bestimmung der kinetischen Energie der Elektronen mittels eines Bremspotentials	Messung des Kurzschlußstroms zwischen p- und n-dotiertem Material

Tabelle 1: Erzeugung von Photostrom.



Gemessen wird die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle, indem die Solarzelle mit monochromatischem Licht beleuchtet und der dadurch erzeugten Kurzschlußstroms gemessen wird /9/. Die integral auf 1 normierten Meßwerte heißen die "gemessene relative spektrale Empfindlichkeit" der Solarzelle. Kennt man die Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts und die Größe der Solarzelle, so lassen sich die gemessenen Werte in  $\text{Am}^2/\text{W}$  als "gemessene absolute spektrale Empfindlichkeit" angeben<sup>1</sup>.

### 3. Mehrfachsolarzellen

Für diejenigen Photonen deren Energie über der Bandlückenenergie liegt, wird die Photoenergie unter Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit nur zum Teil in elektrische Energie umgewandelt. Bei Erzeugung eines Elektron-Loch Paares durch ein einfallendes Photon geht der über die Bandlückenenergie hinausgehende Anteil der Photonenergie verloren. Die Idee der Mehrfachsolarzelle ist es, höherenergetische Photonen durch eine Solarzelle mit großer Bandlückenenergie auszuwerten und die niederenergetischen Photonen, für die diese Solarzelle durchsichtig ist, in einer darunterliegenden Solarzelle kleinerer Bandlückenenergie auszuwerten. Eine Mehrfachsolarzelle besteht somit aus mehreren, übereinander angeordneten Einfachsolarzellen. Wertet man vornehmlich Photonen mit Energie nahe der Bandlückenenergie aus, so vermeidet man außerdem Verluste durch Oberflächenrekombination die sich in der spektralen Empfindlichkeit bei Energien oberhalb der Bandlückenenergie bemerkbar machen (vergleiche Abbildung 4).

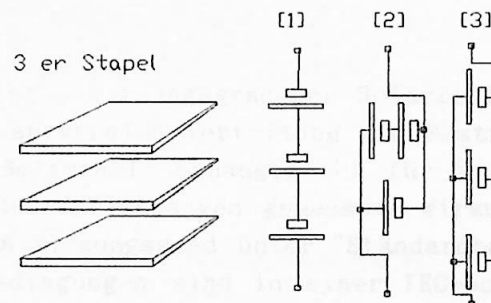


Abbildung 5: Aufbau einer Mehrfachsolarzelle und verschiedene Betriebsmöglichkeiten.

Sind die Teilzellen einer Mehrfachsolarzelle monolithisch aufeinander aufgewachsen und hat man keinen elektrischen Zugriff zu den Mittelkontakten vorgesehen, so muß das Element in Serienschaltung betrieben werden. Die

<sup>1</sup> Die Begriffe relativ und absolut sind in analoger Weise für alle spektralen Verteilungen definiert.

Mehrfachsolarzelle besitzt in diesem Fall nur zwei elektrische Anschlüsse. Diejenige Teilzelle mit dem kleinsten Strom begrenzt den Strom der Mehrfachzelle (Abbildung 5 [1]). Hat man elektrischen Zugriff zu den Teilzellen, so lassen sich auch Parallelschaltungen konstruieren (Abbildung 5 [2],[3]). Die Teilzellen werden dann allerdings nicht am Punkt maximaler Leistung, sondern bei gemeinsamer Spannung betrieben. Der Punkt maximaler Leistung der Teilzellen liegt aufgrund der unterschiedlichen Bandlückenenergien bei unterschiedlichen Spannungen. Die Tabelle 2 zeigt verschiedene Materialien, wie sie für den Bau von Mehrfachsolarzellen heute verwendet werden /10/.

Monolithische Elemente	Mechanisch zusammengesetzte ("stacked") Elemente
AlGaAs/GaAs	(AlGaAs,GaAs)/InGaAs
AlGaAs/GaAs/InGaAs	(AlGaAs,GaAs)/InGaAsP
GaAs/Ge	GaAs/CuInSe <sub>2</sub>
InP/InGaAs	AlGaAs/Si
AlGaAs/Ge	GaAs/GaSb
GaInP <sub>2</sub> /GaAs	(Al)GaAs/Ge
	AlGaAs/InGaAsP

Tabelle 2: Materialien für Mehrfachsolarzellen nach /10/.

## II. Übersicht der Meßtechnik

### 1. Standardbezugsbedingungen

Der durch Gleichung (4) definierte Wirkungsgrad der Solarzelle ist im allgemeinen von der einfallenden spektralen Verteilung und Bestrahlungsstärke sowie von der Temperatur der Solarzelle abhängig. Um für in verschiedenen Labors mit unterschiedlichen Meßeinrichtungen gemessene Wirkungsgrade vergleichen zu können gibt man den Wirkungsgrad unter "Standardbezugsbedingungen"<sup>1</sup> an. Die Standardbezugsbedingungen sind in einer IEC-Norm festgelegt /6/ und gelten international<sup>2</sup>. In Tabelle 3 sind die Standardbezugsbedingungen aufgeführt. Das Spektrum ist von 305 bis 2200 nm in Abbildung 6 dargestellt. Es entspricht der Summe von direkter und diffuser Einstrahlung nach Durchtritt von 1.5 Erdatmosphären und einer Albedo<sup>3</sup> von 0.2 auf eine um 37°

<sup>1</sup> Englisch: Standard Reference Conditions (SRC). Wir sprechen von Bezugs- statt von Referenzbedingungen, da die Norm eher unrealistische Bedingungen vorschlägt: Die Zelltemperatur liegt bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m<sup>2</sup> im allgemeinen über 25° Celsius. Diese Bedingungen stellen daher keine "Referenz" ("Bericht, Auskunft") für die tatsächlich vorliegenden Betriebsbedingungen dar.

<sup>2</sup> Der entsprechende amerikanische Standard ASTM diene als Vorbild für die IEC Norm. Bis auf eine leicht verschiedene Normierung stimmen beide Spektren überein. Zur Herkunft des Referenzspektrums siehe R.Hulstrom et.al., Solar Cells 15, 365-391 (1985).

<sup>3</sup> Rückstrahlung von der Erdoberfläche.

gegen den Horizont geneigten Oberfläche unter den folgenden atmosphärischen Bedingungen:

- Atmosphärischer Wassergehalt: 1.42 cm
- Atmosphärischer Ozongehalt: 0.34 cm
- Feuchtigkeit: 27 % bei 500 nm

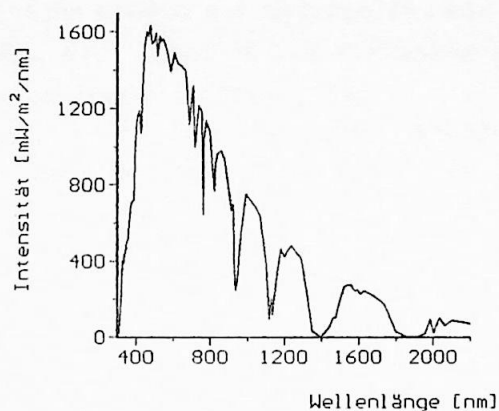


Abbildung 6: Referenzspektrum

Dieses Spektrum wird in der Fachliteratur als AM 1.5 (AIR MASS 1.5) -Spektrum bezeichnet.

Standardbezugsbedingungen	
Temperatur des Testelements	25 ° Celsius
Spektrale Verteilung in der Testebene	Referenzspektrum aus IEC 904-3, Tafel 1
Bestrahlungsstärke	1000 W/m <sup>2</sup> im Wellenlängenbereich von 305 nm - unendlich

Tabelle 3: Standardbezugsbedingungen.

## 2. Bekannte Verfahren zur Messung von Mehrfachsolarzellen unter Standardbezugsbedingungen

Das Konzept der Mehrfachsolarzelle wird verwendet, um den Wirkungsgrad photovoltaischer Elemente zu verbessern. Es werden bereits Zellen mit bis zu drei Teilzellen gebaut. Der höchste Wirkungsgrad der veröffentlicht wurde, lag bei 37,2% [11].

Sind die Teilzellen nicht einzeln elektrisch zugänglich - was in der Praxis oft der Fall ist - so ist bei Mehrfachsolarzellen die Messung des Wirkungsgrades sehr viel komplizierter als bei Solarzellen mit nur einem p-n-Übergang. Charakteristische Größen der Solarzelle, wie der Füllfaktor  $FF$  und die Leerlaufspannung  $V_{oc}$ , die linear in den Wirkungsgrad eingehen, werden abhängig von der spektralen Zusammensetzung des in die Testebene einfallenden Lichtes. Der Grund hierfür ist, daß bei einer Mehrfachsolarzelle, die nur aus elektrisch geschlossenen Zellen besteht, eine der Teilzellen abhängig vom einfallenden Spektrum den Strom begrenzt. Eine veränderte Wellenlänge von Photonen wurde entwickelt und durch die als Methode als "Standardmethode" durchgesetzt. Möchte man unter den Standardbezugsbedingungen messen, so ist die Veranschaulichung eines passenden Spektrums die Bedingung, die am schwierigsten zu erfüllend ist. In den meisten Fällen wird die spektrale Voraussetzung der Bedingung reduziert auf eine einzige Anforderung, daß der Kurzschlußstrom jeder Teilzelle gemessen soll als der Kurzschlußstrom entsprechend den Standardbezugsbedingungen. Wenn diese Anforderung erfüllt ist, dann kann der Kurzschlußstrom des Elements korrekt gemessen werden. Die Leerlaufspannung und der Füllfaktor hängen jedoch immer noch von der spektralen Zusammensetzung des einfallenden Spektrums ab, wie zum Beispiel im Fall der amorphen Silizium, um damit zu einer fehlerhaften I-V Charakteristik führen. Die meisten Methoden benutzen mehrere Lichtquellen entsprechend der Anzahl von Teilzellen [12]/[13]. Die Tabelle 4 gibt einen Überblick der veröffentlichten Messmethoden. Die Abbildung 7 zeigt das spektrale Kurzschlußstrom oder Integral in Standardbezugsbedingungen angepasster monokristalliner Siliziumzelle.

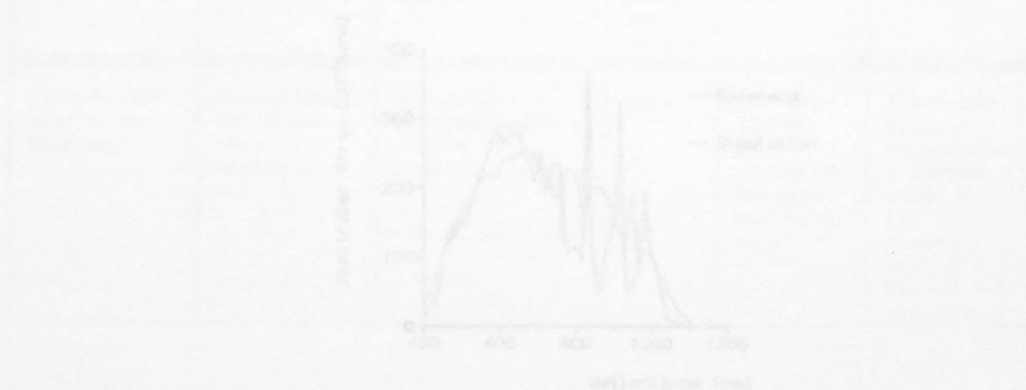


Abbildung 7: Anpassung an Standardbezugsbedingungen



## 2. Bekannte Verfahren zur Messung von Mehrfachsolarzellen unter Standardbezugsbedingungen

Das Konzept der Mehrfachsolarzelle wird verwendet, um den Wirkungsgrad photovoltaischer Elemente zu verbessern. Es wurden bereits Zellen mit bis zu drei Teilzellen gebaut. Der höchste Wirkungsgrad der veröffentlicht wurde, lag bei 32,2% /11/.

Sind die Teilzellen nicht einzeln elektrisch zugänglich - was in der Praxis oft der Fall ist - so ist bei Mehrfachsolarzellen die Messung des Wirkungsgrades sehr viel komplizierter als bei Solarzellen mit nur einem p-n Übergang. Charakteristische Größen der Solarzelle, wie der Füllfaktor  $FF$  und die Leerlaufspannung  $V_{oc}$ , die linear in den Wirkungsgrad eingehen, werden abhängig von der spektralen Zusammensetzung des in die Testebene einfallenden Lichtes. Der Grund hierfür ist, daß bei einer Mehrfachsolarzelle, die nur zwei elektrische Anschlüsse besitzt, eine der Teilzellen abhängig vom einfallenden Spektrum den Strom begrenzt. Eine verwirrende Vielzahl von Meßtechniken wurde entwickelt und noch hat sich keine Methode als "Standardmethode" durchgesetzt. Möchte man unter den Standardbezugsbedingungen messen, so ist die Verwendung eines passenden Spektrums die Bedingung, die am schwierigsten zu erfüllend ist. In den meisten Fällen wird die spektrale Formulierung der Bedingung reduziert auf eine integrale Forderung die verlangt, daß der Kurzschlußstrom jeder Teilzelle übereinstimmen soll mit dem Kurzschlußstrom entsprechend den Standardbezugsbedingungen. Wenn diese Forderung erfüllt ist, dann kann der Kurzschlußstrom des Elements korrekt gemessen werden. Die Leerlaufspannung und der Füllfaktor mögen jedoch immer noch von der spektralen Zusammensetzung des eingestrahlteten Spektrums abhängen, wie zum Beispiel im Fall des amorphen Siliziums, und damit zu einer fehlerhaften I-U Charakteristik führen. Die meisten Methoden benutzen mehrere Lichtquellen entsprechend der Anzahl von Teilzellen /12//10/. Die Tabelle 4 gibt einen Überblick der veröffentlichten Meßmethoden. Die Abbildung 7 zeigt den spektralen Kurzschlußstrom einer integral an Standardbezugsbedingungen angepaßten monokristallinen Siliziumzelle.

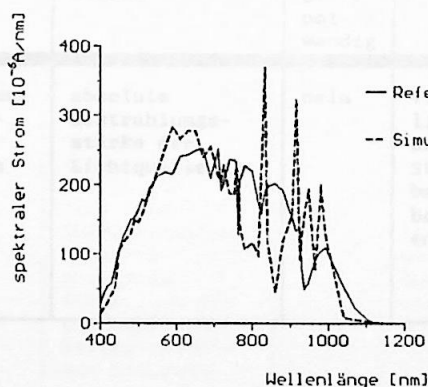


Abbildung 7: Anpassung an Standardbezugsbedingungen



In diesem Abschnitt werden bekannte Methoden besprochen, und ausgesuchte, mit den jeweiligen Methoden verknüpfte, Meßunsicherheiten werden genannt. Eine sehr vielversprechende Methode mit dem Potential hoher Genauigkeit benutzt Referenzzellen für jede Teilzelle einer Mehrfachzelle. Im Abschnitt III.1. bespreche ich diese Methode ausführlicher. Sie könnte die Standardmethode zur Wirkungsgradmessung an Mehrfachsolarzellen am Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme werden.

## 2.1. Die "Methode der besten Anpassung"

Am einfachsten lässt sich der Wirkungsgrad bestimmen, wenn das Spektrum des Solarsimulators dem Referenzspektrum so nahe kommt, daß keine weitere Korrektur mehr notwendig ist. Jedes photovoltaische Element kann gemessen werden, ohne daß der Simulator vorher justiert werden muß. Benutzt man entsprechend gefilterte Lichtquellen, die in der Testebene zusammengemischt werden, so läßt sich das Referenzspektrum recht genau nachbilden /13//14/. Zur Kalibrierung müssen die absoluten Bestrahlungsstärken, gemessen mit einem Spektralradiometer, bekannt sein. Die Absolutkalibrierung kann mithilfe eines integral kalibrierten Bestrahlungsstärkemessers (Referenzzelle oder thermischer Detektor) vorgenommen werden.

Dieses Verfahren erfordert außergewöhnliche technische Anstrengungen besonders dann, wenn mit hoher Präzision gemessen werden soll. Es ist jedoch der einzige Weg Meßunsicherheiten im Fall spektral abhängiger Solarzellenparameter prinzipiell zu vermeiden.

Methode	Justage des Solar-simulators	Kalibrierung der Bestrahlungsstärke	direkter Zugriff notwendig	Ziel der Methode	Anmerkung	Referenz
Methode der besten Anpassung	Nachbildung des Referenzspektrums	absolute Bestrahlungsstärke der Lichtquelle(n)	nein	verwirklichen der Standardbezugbedingungen	Standardbezugbedingungen werden nicht nur für Isc, sondern auch für FF und Voc erreicht.	/13/ /14/

Fortsetzung

Methode	Justage des Solar-simulators	Kalibrierung der Bestrahlungsstärke	direkter Zugriff notwendig	Ziel der Methode	Anmerkung	Referenz
Methoden absolut bekannter spektraler Empfindlichkeiten	Kurzschlußstrom jeder Teilzelle entsprechend den Standard-bezugsbedingungen	absolute spektrale Empfindlichkeiten der Teilzellen	ja	Isc der Teilzellen gleich wie unter Standard-bezugsbedingungen		/10/
		absolute spektrale Empfindlichkeiten der Teilzellen und absolute spektrale Verteilungen der Lichtquellen	nein	Isc der Teilzellen gleich wie unter Standard-bezugsbedingungen	Unsicherheiten in der Kalibrierung der absoluten Bestrahlungsstärke werden die Meßunsicherheiten dominieren	
Referenzzellenmethoden	spektrale Fehlanpassung angewandt auf die strombegrenzende Teilzelle	relative spektrale Empfindlichkeiten von Test- und Referenzzellen, relative spektrale Verteilung der Lichtquellen, Kalibrierwert der Referenzelemente	nein	Isc des Elementes gleich wie unter Standard-bezugsbedingungen	nur eine Lichtquelle mit spektraler Verteilung nahe dem Referenzspektrum notwendig	/17/
	Kurzschlußstrom geeigneter Referenzelemente entsprechend Standard-bezugsbedingungen	Kalibrierwerte der Referenzelemente	nein	Isc der Teilzellen gleich wie unter Standard-bezugsbedingungen	mit den Teilzellen übereinstimmende Referenzelemente notwendig	/26/
	spektrale Fehlanpassung auf jede Teilzelle gleichzeitig angewandt	relative spektrale Empfindlichkeiten von Test- und Referenzzellen, relative spektrale Verteilung der Lichtquellen, Kalibrierwerte der Referenzelemente	nein	Isc der Teilzellen gleich wie unter Standard-bezugsbedingungen	Potential sehr hoher Genauigkeit	/27/ Absch. III.1. dieser Arbeit

Tabelle 4: Meßtechniken im Überblick.

## 2.2. Methoden absolut bekannter spektraler Empfindlichkeiten

Um das passende Spektrum einzustellen benutzen manche Methoden die absoluten spektralen Empfindlichkeiten der Teilzellen, die auch bei Elementen gemessen werden können, deren Teilzellen nicht einzeln elektrisch zugreifbar sind /9//15//16/. Das Ziel dieser Methoden ist es den Simulator so zu justieren, daß die Teilzellen genau den Kurzschlußstrom produzieren, den sie unter Standardbezugsbedingungen produzieren würden. Um den Strom jeder Teilzelle einstellen zu können, muß das Spektrum variierbar sein. Justiert man mit Hilfe eines Freiheitsgrades (zum Beispiel mit einer farbigen Lampe<sup>1</sup>) den Strom einer der Teilzellen, so ändert sich im allgemeinen auch der Strom der anderen Teilzellen. Das Verfahren muß daher iterativ angewendet werden.

### 2.2.1. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeit der strombegrenzenden Teilzelle

Für Solarsimulatoren mit unveränderlichem Spektrum nahe dem Referenzspektrum (wie zum Beispiel passend gefilterte Xenonsolarsimulatoren) wurde eine einfach anzuwendende Methode von K. Emery vorgeschlagen /12/. Das Ziel dieser Methode ist es, den Simulator so zu justieren, daß der Strom der strombegrenzenden Teilzelle der gleiche ist wie der Strom dieser Zelle gemäß Standardbezugsbedingungen. Die strombegrenzende Zelle kann aus den absoluten spektralen Empfindlichkeiten errechnet werden. Der Intensitätskoeffizient  $\mu$  der betreffenden Lichtquelle mit spektraler Verteilung  $E$  wird dann so justiert, daß

$$\int E_{SRC}(\lambda) s_{TC}(\lambda) d\lambda = \mu \int E(\lambda) s_{TC_{limit}}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

erfüllt ist.  $E_{SRC}$  ist das Referenzspektrum und  $s$  bezeichnet die absolute spektralen Empfindlichkeit, wobei der Index  $TC_{limit}$  die strombegrenzende Teilzelle bezeichnet. Integriert wird dabei über alle Wellenlängen, für die die spektralen Empfindlichkeiten zum Integral beitragen. Der Vorteil dieser Methode ist, daß nur eine Lichtquelle benötigt wird. Das Spektrum dieser Lichtquelle sollte aber dem Referenzspektrum soweit ähnlich sein, daß die strombegrenzende Teilzelle für Referenz- und Simulatorspektrum dieselbe bleibt. Nur die strombegrenzende Teilzelle entspricht bei diesem Verfahren den Bezugsbedingungen. Die anderen Teilzellen können weit davon entfernt sein und damit Fehler in den Solarzellenparametern  $V_{oc}$  und  $FF$  verursachen.

<sup>1</sup> Im folgenden wird statt von Freiheitsgraden in der Variierbarkeit der spektralen Verteilung der Einfachheit halber von den verschiedenen Lichtquellen eines Solarsimulators gesprochen. Das Spektrum kann auch durch Filterung variiert werden.



#### 2.2.2.2. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeit aller Teilzellen

Wenn direkter elektrischer Zugriff zu allen Teilzellen möglich ist, dann kann der Solarsimulator in den Intensitätskoeffizienten  $\mu_i$  so justiert werden, daß der Reihe nach für alle Teilzellen gilt:

$$\int E_{SRC}(\lambda) S^{TC_i}(\lambda) d\lambda = \mu_i^{(k)} \int E_i(\lambda) S^{TC_i}(\lambda) d\lambda \quad i = 1..n \quad (2)$$

wiederholt angewandt, solange bis

$$\mu_i^{(k)} = \mu_i^{(k-1)} \quad i = 1..n \quad (3)$$

Der Index  $i=1..n$  bezeichnet die Teilzellen, der Index  $j=1..n$  bezeichnet die geeigneten Lichtquellen und der Index  $k$  bezeichnet den  $k$ 'ten Iterationsschritt. Dies ist eine elegante Methode, um die Kennlinienparameter von Solarzellen mit elektrisch einzeln zugreifbaren Teilzellen zu messen. Diejenigen Teilzellen, die bei dem Verfahren nicht gemessen werden sollten am Punkt maximaler Leistung  $P_{Max}$  gehalten werden um Einflüsse dieser Teilzellen zumindest nahe des Punktes maximaler Leistung zu minimieren.

#### 2.2.3. Absolut bekannte spektrale Empfindlichkeiten und Bestrahlungsstärken

Hat man keinen elektrischen Zugriff auf die einzelnen Teilzellen, so müssen nicht nur die absoluten spektralen Empfindlichkeiten, sondern auch die absoluten spektralen Verteilungen  $\mu_j E_j$  der Lichtquellen des Solarsimulators in der Testebene bekannt sein. Man kann entweder die  $\mu_i^{(k)}$ 's in Gleichung (2) iterativ lösen, solange bis Gleichung (3) erfüllt ist oder die Intensitätskoeffizienten  $\mu_j$  durch Lösung von  $n$  linear abhängigen Gleichungen in den  $\mu_j$  berechnen:

$$\int E_{SRC}(\lambda) S^{TC_i}(\lambda) d\lambda = \int \sum_{j=1}^n \mu_j E_j(\lambda) S^{TC_i}(\lambda) d\lambda \quad i=1..n \quad (4)$$

Diese Methode ist jedoch sehr anfällig für Meßunsicherheiten, entsprechend der Schwierigkeit absolute Bestrahlungsstärken mit hoher Genauigkeit zu messen.

## 2.3. Referenzzellenmethoden

Da die Absolutkalibrierung von Bestrahlungsquellen mit hoher Genauigkeit schwierig ist werden üblicherweise absolut kalibrierte Bestrahlungsstärkemesser, das sind Referenzzellen oder Pyranometer, verwendet. Referenzzellenmethoden machen Gebrauch von dem Kalibrierwert<sup>1</sup>  $CN$ , das ist der Kurzschlußstrom der Referenzzelle gemäß den Standardbezugsbedingungen<sup>2</sup>:

$$CN = \int E_{SRC}(\lambda) S^{RC}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

mit dem Referenzspektrum  $E_{SRC}$  (siehe Abbildung 6, Seite 7) und der absoluten spektralen Empfindlichkeit der Referenzzelle  $S^{RC}$ . Der Kalibrierwert kann entweder aus absoluten spektralen Empfindlichkeit der Referenzzelle und dem Referenzspektrum berechnet werden oder unter geeigneten Bedingungen gemessen werden /17 18 19 20 21 22/.

Für herkömmliche Solarzellen mit nur einem p-n Übergang wurde eine Methode entwickelt, die den Unterschied in der spektralen Empfindlichkeit von Testzelle und Referenzzelle berücksichtigt /23 24 25/. Nur die relativen spektralen Empfindlichkeiten von Test- und Referenzzelle sowie der Kalibrierwert der Referenzzelle wird benötigt. Bei dieser "Methode der spektralen Fehlanpassung" werden Meßunsicherheiten durch Absolutkalibrierung der Einstrahlung in der Testebene vermieden.

### 2.3.1. Methode der spektralen Fehlanpassung angewandt auf die strombegrenzende Teilzelle

Benutzt man einen Solarsimulator mit unveränderlichem Spektrum so kann man die herkömmliche Methode der spektralen Fehlanpassung auf die strombegrenzende Teilzelle anwenden. Die Justierung der Lichtquellen erfolgt dann gemäß

$$CN \equiv M_{limit} \int \sum_{j=1}^n \mu_j E_j(\lambda) S^{RC}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

wobei  $M_{limit}$ , der Fehlanpassungsfaktor, aus der strombegrenzenden Teilzelle berechnet wird (zur Definition von  $M$  siehe Gleichung (7) unten). Die spektrale Empfindlichkeit  $S$  muß jetzt und im folgenden nur noch dem relativen Verlauf nach bekannt sein. Ohne die absoluten spektralen Empfindlichkeiten

<sup>1</sup> Engl. Calibration Number.

<sup>2</sup> Manche Autoren ziehen es vor, den Kurzschlußstrom dividiert durch  $1000 \text{ W/m}^2$  als  $CN$  zu bezeichnen.



und absoluten Bestrahlungsstärken zu kennen, ist es nicht möglich zu sagen, ob die strombegrenzende Teilzelle unter Simulator- und Referenzspektrum dieselbe ist. Die Abweichungen der Fehlanpassungsfaktoren  $M_i$  voneinander ergeben eine Abschätzung für die zugehörige Meßunsicherheit; da alle Teilzellen, nicht nur die strombegrenzende, den korrekten Kurzschlußstrom unter dem Simulatorspektrum liefern würden, wenn die Abweichungen verschwinden würden.

### 2.3.2. Übereinstimmende Referenzzellen

Eine weitere Methode, einen Mehrquellensolarsimulator zu justieren, besteht darin, mit den relativen spektralen Empfindlichkeiten der Testzellen übereinstimmende Referenzzellen zu verwenden /26/. Kennt man die Kalibrierwerte, die absoluten spektralen Empfindlichkeiten und die absoluten Bestrahlungsstärken der Lichtquellen, so kann man die Intensitätskoeffizienten  $\mu_i$  durch Lösen von  $n$  linear abhängigen Gleichungen berechnen:

$$CN_i = \int \sum_{j=1}^n \mu_j E_j(\lambda) S^{RC_i}(\lambda) d\lambda \quad i=1..n \quad (7)$$

mit dem Kalibrierwert der  $i$ 'ten Referenzzelle  $CN_i$ . Das Superskript  $RC_i$  zeigt die zur  $i$ 'ten Teilzelle korrespondierenden Referenzzelle an. Ohne eine Messung der spektralen Verteilung kann der Simulator justiert werden, indem man  $\mu_j$  durch  $\mu_j^{(k)}$  ersetzt und solange iterativ justiert, bis Gleichung (3) erfüllt ist.

Diese Methode ist einfach zu handhaben, hat aber den Nachteil großer Meßunsicherheiten, wenn die spektralen Empfindlichkeiten von Test- und Referenzzellen voneinander abweichen<sup>1</sup>. Ist hohe Genauigkeit verlangt, so wird es schwierig, passende Referenzzellen zu finden. Die Erfordernis passender kalibrierter Referenzzellen macht diese Methode kompliziert, wenn Mehrfach-solarzellen verschiedener Technologien gemessen werden sollen.

<sup>1</sup> In der Praxis weichen diese Größen selbstverständlich immer voneinander ab. Gemeint ist, daß die Abweichung, z.B. aufgrund verschiedener Materialien von Test- und Referenzzellen, die durch die Forderung an die Meßgenauigkeit gestellten Grenzen überschreitet.

### 2.3.3. Die Methode der selbstkonsistenten Verteilungen

Diese Methode besteht darin, die Methode der spektralen Fehlanpassung für jede Teilzelle. Damit lauten die korrekten Gleichungen für  $n$  Quellen und  $n$  Test- / Referenzzellenkombinationen <sup>1</sup> /27/:

$$CN_i \equiv M_i \int \sum_{j=1}^n \mu_j E_j(\lambda) s^{RC_i}(\lambda) d\lambda \quad i=1..n$$

$$\text{mit } M_i = \frac{\int E_{SRC}(\lambda) s^{RC_i}(\lambda) d\lambda}{\int \sum_{j=1}^n \mu_j E_j(\lambda) s^{RC_i}(\lambda) d\lambda} \frac{\int \sum_{j=1}^n \mu_j E_j(\lambda) s^{TC_i}(\lambda) d\lambda}{\int E_{SRC}(\lambda) s^{TC_i}(\lambda) d\lambda}$$
(8)

Diese in den Intensitätskoeffizienten  $\mu_i$  gekoppelten nichtlinearen Gleichungen können im Grenzfall, daß

$$\int E_i(\lambda) s^{RC_i}(\lambda) d\lambda \approx \int \sum_{j=1}^n E_j(\lambda) s^{RC_i}(\lambda) d\lambda$$
(9)

d.h. der spektrale Überlapp der Lichtquellen vernachlässigt werden kann und daß

$$s^{TC_i}(\lambda) \approx s^{RC_i}(\lambda)$$
(10)

d.h. die spektralen Empfindlichkeiten von Test- und Referenzzellen einander ähnlich sind, auf lineare, ungekoppelte Gleichungen reduziert werden:

$$CN_i \equiv M_i \mu_i \int E_i(\lambda) s^{RC_i}(\lambda) d\lambda \quad i=1..n$$
(11)

Ersetzt man nun  $M_i$  durch  $M_i^{(k-1)}$  und  $\mu_i$  durch  $\mu_i^{(k)}$ , so erhält man durch iteratives Lösen von Gleichung (10) die Lösung von Gleichung (7). Der Itera-

<sup>1</sup> Sind mehr Lichtquellen als Teilzellen vorhanden, so benötigt man eine zusätzliche definierende Bedingung für die Justierung des Solarsimulators. Man wird versuchen, die Abweichung vom Referenzspektrum mit den überzähligen Freiheitsgraden im Simulatorspektrum zu minimieren.

tionsprozess ist beendet, wenn  $M_i^{(k)} = M_i^{(k-1)}$ <sup>1</sup>. Dieser Iterationsprozess wird üblicherweise experimentell vorgenommen, indem die einzelnen Lichtquellen sukzessiv justiert werden /28//29/. In III.1. zeige ich, daß diese Methode ein Äquivalent in den Rechenmethoden der Quantenmechanik besitzt - die Methode der selbstkonsistenten Felder. Ich gehe dort auf diese Methode näher ein.

### III. Material und Methode

#### 1. Anwendung der Methode der selbstkonsistenten Verteilungen in der Solarsimulation für Mehrfachsolarzellen

Die Tabelle 5 vergleicht die wichtigen Größen der Hartree-Methode der selbstkonsistenten Felder<sup>2</sup>, die zur Lösung von Vielteilchenproblemen der Quantenmechanik benutzt wird<sup>3</sup>, mit der Methode der Fehlanpassung für jede Teilzelle. Beide Methoden sind iterativ und haben als Kriterium für Konvergenz der nicht analytisch berechenbaren Verteilungen gegen die Lösung der zugrundeliegenden Gleichungen, daß sich die "Anpassungsfunktion" (siehe Tabelle) im folgenden Iterationsschritt nicht mehr ändert. Dieses Kriterium wird als "Selbstkonsistenz" bezeichnet. Die dem Hartree-Verfahren zugrundeliegende Gleichungen lauten in den Wellenfunktionen der Elektronen  $\varphi_i$ :

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 - \frac{Ze^2}{r_i} + V_i(\vec{x}_i) \right) \varphi_i(\vec{x}_i) = \epsilon_i \varphi_i(\vec{x}_i) \quad (1)$$

wobei die ersten beiden Terme die kinetische Energie und das Kernpotential bezeichnen, und der dritte Term das elektrostatische Potential der Ladungsverteilung der übrigen Elektronen bezeichnet:

$$V_i(\vec{x}_i) = \sum_{j \neq i} \int d^3x_j \frac{e^2}{|\vec{x}_i - \vec{x}_j|} |\varphi_j(\vec{x}_j)|^2 \quad (2)$$

<sup>1</sup> Aufgrund auftretender Meßunsicherheiten ist diese Forderung durch die Forderung zu ersetzen, daß der Unterschied zwischen den beiden Faktoren klein sei (siehe Gl.(1) Seite 60).

<sup>2</sup> Gemeint sind damit die elektrostatischen Felder von Elektronen.

<sup>3</sup> In der Praxis werden hier verbesserte Methoden eingesetzt: So berücksichtigt Hartree-Fock das Pauli-Prinzip durch Einführung der Slater-Determinanten. Auch wird der Ansatz der Wellenfunktionen freier Elektronen in der Praxis durch bessere Ansätze ersetzt, etwa durch LCAO-Methoden (Tight Binding).

$\vec{x}_i$  bezeichnet den Ort des  $i$ 'ten Elektrons,  $r_i$  seinen Abstand zum Kern,  $Z$  die Kernladungszahl,  $e$  die Elementarladung und  $\epsilon_i$  den Energieeigenwert zum Hamiltonoperator. Die Gleichung (11) wird gelöst, indem man die Wellenfunktionen der Elektronen für gegebene Potentiale (Startwerte) berechnet, sich aus den so berechneten Wellenfunktionen wiederum die Potentiale neu berechnet und so fort, bis sich die so iterativ berechneten Potentiale nicht mehr ändern /30/.

	Hartree Verfahren für freie Elektronen	spektrale Fehlanpassung für jede Teilzelle
Anpassungsfunktionen	Elektrostatische Potentiale für die Ladungsverteilungen der Elektronen	Fehlanpassungsfaktoren der Teilzellen
Parameter	Impulse der Elektronen	Intensitätskoeffizienten der Lichtquellen
Ergebnis des Verfahrens	Mehrteilchenwellenfunktion als Produkt der Einteilchenwellenfunktionen	Simulatorspektrum als Summe der Beiträge der einzelnen Lichtquellen

Tabelle 5: Hartree-Verfahren der selbstkonsistenten Felder im Vergleich mit der Methode der spektralen Fehlanpassung für jede Teilzelle

Der Vergleich mit dem bekannten Verfahren aus der Festkörperphysik möge die Probleme deutlich machen, die sich beim Übergang von einer Meßtechnik für Einfachsolarzellen auf eine Meßtechnik für Mehrfachsolarzellen ergeben. Die Abbildung 8 zeigt das Flußdiagramm zum Meßverfahren, wie ich es zum Erreichen der Standardbezugsbedingungen vorschlage:

Der Vergleich mit dem bekannten Verfahren aus der Festkörperphysik möge die Probleme deutlich machen, die sich beim Übergang von einer Meßtechnik für Einfachsolarzellen auf eine Meßtechnik für Mehrfachsolarzellen ergeben. Die Abbildung 8 zeigt das Flußdiagramm zum Meßverfahren, wie ich es zum Erreichen der Standardbezugsbedingungen vorschlage:

<sup>1</sup> Unvollständigkeiten in der Berechnung der Absolutmessung werden sich nach Gleichung (11), Abschnitt 11.2.2.1., als Unvollständigkeiten in den Intensitätskoeffizienten aus.



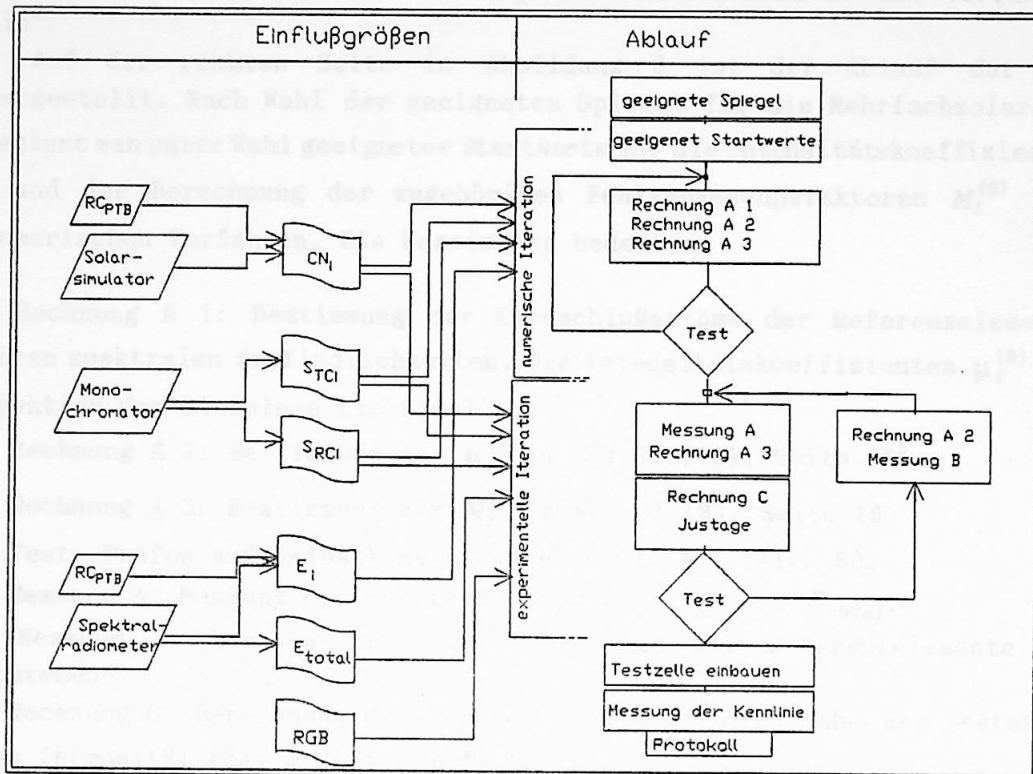


Abbildung 8: Flußdiagramm zur Methode der selbstkonsistenten Verteilungen.

Auf der linken Seite sind die Einflußgrößen dargestellt: Die Kalibrierung erfolgt über kalibrierte Referenzzellen. Mit unserem Präzisionsmessplatz für die Messung herkömmlicher Solarzellen /31 32 33 34 35/ lassen sich daraus die Kalibrierwerte  $CN_i$  für gefilterte Referenzelemente bestimmen. Mithilfe der zur Verfügung stehenden Monochromatoren lassen sich die spektralen Empfindlichkeiten von Test- und Referenzzellen bestimmen /9/. Die absoluten spektralen Empfindlichkeiten der Referenzelemente werden aus den Kalibrierwerten  $CN_i$  bestimmt<sup>1</sup>. Um die Ströme der Referenzzellen im numerischen Teil berechnen zu können, müssen die Spektren der einzelnen Lichtquellen  $E_i$  absolut gemessen werden. Für den experimentellen Teil genügt eine Relativmessung der Summe aller Spektren  $E_{total}$ . Um die Lichtquellen zu justieren, müssen die Intensitäten gemessen werden. Dies geschieht mit Hilfe gefilterter Solarzellen ("RGB" -Sensoren, siehe Abschnitt III.6.2.). Als

<sup>1</sup> Meßunsicherheiten in der Normierung der Absolutmessung wirken sich nach Gleichung (11), Abschnitt II.2.2.3., als Unbestimmtheiten in den Intensitätskoeffizienten aus.

Einflußgröße geht die Kalibrierung der RGB-Sensoren in das Verfahren mit ein<sup>1</sup>.

Auf der rechten Seite in Abbildung 8 ist der Ablauf der Messung dargestellt. Nach Wahl der geeigneten Spiegel für die Mehrfachsolarzelle<sup>2 3</sup> beginnt man unter Wahl geeigneter Startwerte für die Intensitätskoeffizienten  $\mu_i^{(0)}$ <sup>4</sup> und der Berechnung der zugehörigen Fehlanpassungsfaktoren  $M_i^{(0)}$  mit dem numerischen Verfahren. Die Bezeichner bedeuten:

- Rechnung A 1: Bestimmung der Kurzschlußströme der Referenzelemente aus deren spektralen Empfindlichkeiten, den Intensitätskoeffizienten  $\mu_i^{(k)}$  und den Spektren der einzelnen Lichtquellen.
- Rechnung A 2: Bestimmung der  $\mu_i^{(k)}$ 's aus Gl.(11), Seite 16<sup>5</sup>.
- Rechnung A 3: Bestimmung der  $M_i^{(k)}$ 's aus Gl.(8), Seite 16.
- Test: Prüfen auf Selbstkonsistenz nach Gl.(1), Seite 60.
- Messung A: Messung des Spektrums in der Testebene:  $E_{total}$ .
- Messung B: Messung der Kurzschlußströme der Referenzelemente in der Testebene.
- Rechnung C: Berechnung der Ströme der RGB-Sensoren nahe der Testebene aus den Intensitätskoeffizienten  $\mu_i^{(k)}$ <sup>6</sup>.
- Justage : Die Lichtquellen werden der Intensität nach so justiert, daß die gemessenen Ströme der RGB-Sensoren mit den in Rechnung C berechneten Strömen übereinstimmen.

Ist experimentelle Selbstkonsistenz erreicht, kann die Kennlinie unter Standardbezugsbedingungen gemessen werden. In das Meßprotokoll werden, außer den Kennlinienparametern, auch die spektralen Ströme der Teilzellen während der Messung aufgenommen.

---

<sup>1</sup> Wahlweise könnte, statt über die RGB-Sensorik in der Testebene, die Intensität der Lichtquellen gesondert gemessen werden. Allerdings hängt nur die Konvergenzgeschwindigkeit, nicht aber die Konvergenzgüte von dieser Einflußgröße ab (vergl. Abschnitt IV.3.).

<sup>2</sup> Die Teilzellen sollen möglichst unabhängig beleuchtet werden.

<sup>3</sup> Siehe Anhang B zur Auswahl geeigneter Spiegel.

<sup>4</sup> Etwa so, daß die spektrale Einstrahlung in der Testebene dem Referenzspektrum möglichst nahe kommt.

<sup>5</sup> Eine Verbesserung des Verfahrens zur Bestimmung der Intensitätskoeffizienten könnte folgendermaßen geschehen: Durch Entwicklung des Gleichungssystems (8), Seite 16, linear in den Intensitätskoeffizienten (Taylorentwicklung in 1. Ordnung) erhielte man ein lineares, gekoppeltes Gleichungssystem, daß sich durch Matrixinversion lösen ließe. Durch dieses verbesserte Verfahren wären Abweichungen, wie sie durch die Gleichungen (9) und (10) beschrieben werden, in erster Ordnung berücksichtigt.

<sup>6</sup> Die Berechnung erfolgt nach dem in (III.3.2.2.) genannten Verfahren. Zusätzlich kann man die Versorgungsspannung der Lampen für diese Einstellung berechnen, was die Justierung in der Praxis sehr vereinfacht.

## 2. Kopplung der Meßtechnik an physikalischen Einheiten: Referenzelemente zur Apparatur

Physikalische Größe	Einheit	Physikalische Größe	Einheit
Strahlungsenergie	Joule	Lichtstrom	lm
Strahlungsleistung	Watt	Spezifische Lichtausbreitung	lm/m²
Spezifische Ausbreitung	W/m²	Beleuchtungsstärke	lm/m² (Lux)
Beleuchtungsstärke	W/m²	Lichtausbreitung	lm/m² (Lux)
Strahlungsstärke	W/m²	Leuchtdichte	lm/m²

Tabelle 6: Radiometrische und photometrische Konstanten

### 3. Messung und Beurteilung

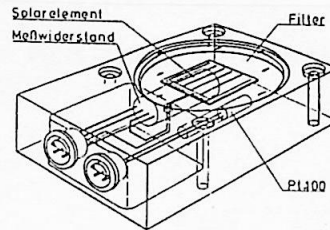


Abbildung 9: Referenzelement der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)

Abbildung 9<sup>1</sup> zeigt ein Referenzelement der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig, wie es von uns zur Präzisionsmessung von Solarzellen benutzt wird. Der Sinn der Referenzelemente besteht darin, mit Strom-Spannungsmeßgeräten meßbare Größen auf Einheiten der Radiometrie zurückzuführen. Die radiometrischen Größen entsprechen dabei der physikalischen Beschreibung mehr als psychophysikalische oder photometrische Größen. Bei den photometrischen Größen werden die Lichteinheiten auf das menschliche Auge bezogen. Die Umrechnung zwischen den beiden Systemen ist durch den Umrechnungsfaktor  $K_M = 680 \text{ lm/W}$  bei 555 nm festgelegt und wird in /36/ näher diskutiert<sup>2</sup>. Die Meßtechnik wird mit dem internationalen Maßeinheitensystem durch Kalibrierung des Kurzschlußstroms eines Referenzelementes unter  $1000 \text{ W/m}^2$  (siehe Tabelle 6: Bestrahlungsstärke) verbunden. Dadurch werden alle in der Tabelle aufgeführten Größen durch Umrechnung zugänglich. Die Angabe der Bestrahlungsstärke reicht für die Meßtechnik aus.

<sup>1</sup> Entnommen aus Laser/ Optoelektronik in der Technik, W.Waidelich (Herausg.), J.Metzdorf, H.Kaase, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, (1986).

<sup>2</sup> Lampenhersteller bevorzugen psychophysikalische Einheiten. Für die Suche geeigneter Lichtquellen ist daher die Umrechnung oft notwendig.



Radiometrie		Photometrie	
Physikalische Größe	SI-Einheiten	Psychophysikalische Größe	SI-Einheiten
Strahlungsenergie	Joule	Lichtmenge	lm-s
Strahlungsfluß	Watt	Lichtstrom	lumen
Spezifische Ausstrahlung	W/m <sup>2</sup>	Spezifische Lichtausstrahlung	lm/m <sup>2</sup>
Bestrahlungsstärke	W/m <sup>2</sup>	Beleuchtungsstärke	lm/m <sup>2</sup> (Lux)
Strahlstärke	W/sr	Lichtstärke	lm/sr (Candela)
Strahldichte	W/sr-m <sup>2</sup>	Leuchtdichte	lm/sr-m <sup>2</sup>

Tabelle 6: Radiometrische und photometrische Nomenklatur

### 3. Messung und Beurteilung einer räumlichen Intensitätsverteilung

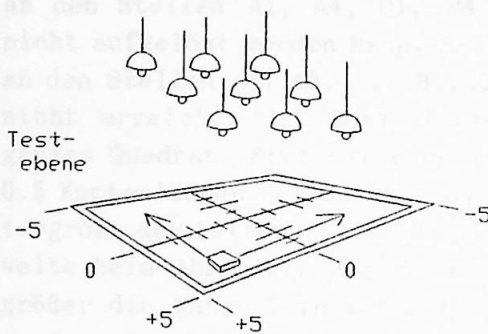


Abbildung 10: Messung einer räumlichen Intensitätsverteilung

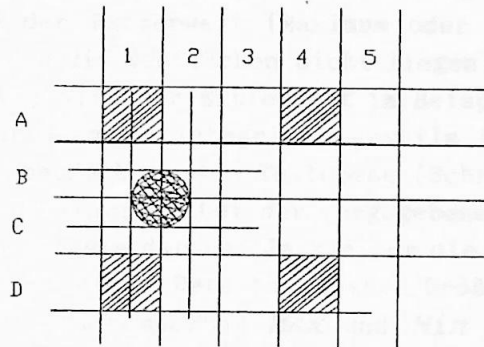


Abbildung 11: Auffinden eines Extremwerts (schraffierter Kreis) abhängig von der Rasterung der Testebene (Auflösung).

Die räumliche Intensitätsverteilung eines Solarsimulators ist ein wichtiges Kriterium in der Beurteilung der Meßunsicherheiten /33/. Für manche Solarzellenmaterialien<sup>1</sup> hängen die Kennlinienparameter von der Inhomogenität ab. Bei einem Mehrquellensimulator ist die räumliche Intensitätsverteilung der Beiträge der einzelnen Lichtquellen außerdem eine Fehlerquelle bei der Messung der spektralen Verteilung<sup>2</sup>. Die Abbildung 10 zeigt die Messung der räumlichen Intensitätsverteilung: Ein Bestrahlungsstärkesensor (Solarzelle) wird innerhalb der Testebene an verschiedene Positionen gefahren und der Kurzschlußstrom gemessen. Nach der IEC-Norm von 1987 /37/ ist die räumliche Inhomogenität als Maß für die Breite der Intensitätsverteilung definiert als

$$\text{Inhomogenität} = \frac{\text{Max} - \text{Min}}{\text{Max} + \text{Min}}$$

Definition 1.

<sup>1</sup> Dünnschichtmaterialien, multikristalline Zellen.

<sup>2</sup> Vergleiche Seite 58.



wobei *Max* den größten Meßwert und *Min* den kleinsten Meßwert bezeichnet. Eine andere Definition wurde vorgeschlagen /38/:

$$\text{Inhomogenität} = \frac{\text{Max} - \text{Min}}{\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X_i}$$

Definition 2.

Im Nenner steht neben dem Faktor 2 der Schätzer für den Mittelwert<sup>1</sup> der Meßwerte.

Beide Definitionen hängen von der Lage der Meßpunkte in der Testebene ab: Abbildung 11 veranschaulicht, daß im Fall einer zu groben Rasterung (Messung an den Stellen A1, A4, D1, D4 ...) der Extremwert (Maximum oder Minimum) nicht aufgelöst werden kann. Selbst wenn die Meßflächen dicht liegen (Messung an den Stellen A1, A2, ... B1, B2, ...) wird der Extremwert im Beispiel noch nicht erreicht; der Bestrahlungsstärkesensor integriert jeweils über ein ganzes Quadrat. Erst bei vierfacher Überdeckung der Testebene (Schrittweite 0.5 Kantenlängen des Detektors) wird im Beispiel bei der vorgegebenen Detektorgröße der Extremwert erreicht. Ich folgere daraus: Je kleiner die Schrittweite beim Abrastern der Testfläche mit einem Detektor fester Größe, desto größer die Wahrscheinlichkeit, daß die Extremwerte *Max* und *Min* gefunden werden. Das bedeutet, daß die Inhomogenität nach Definition 1 und 2 von der Schrittweite (der Auflösung) der Messung abhängt. Ich schlage daher folgende Definition vor, die in ihrem Erwartungswert von der Auflösung unabhängig ist<sup>2</sup>:

$$\text{Inhomogenität} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_{0.84} - \alpha_{0.16}}{\alpha_{0.50}}$$

Definition 3.

wobei  $\alpha_{0.16}$  das 0.16 Quantil,  $\alpha_{0.50}$  das 0.5 Quantil (Median) und  $\alpha_{0.84}$  das 0.84 Quantil der Verteilung der Meßwerte ist. Das Quantil  $\alpha_{0.16}$  einer Verteilung einer Zufallsvariablen gibt dabei den Wert an, bis zu dem sich 16% der Werte der Verteilung befinden /39/<sup>3</sup>. Sind die gemessenen Intensitäten gaußverteilt, so ergibt die vorgeschlagene Definition gerade die Standardabweichung der Gaußfunktion dividiert durch den Mittelwert. Abbildung 12 veranschaulicht dies folgendermaßen: Die Intensität ist, als Zufalls-

<sup>1</sup> Die Stochastik unterscheidet zwischen dem "wahren" Mittelwert und seinem Schätzer (auch: Schätzfunktion). Die Unterscheidung ist zum Verständnis der folgenden Diskussion notwendig.

<sup>2</sup> "Im Erwartungswert unabhängig von der Auflösung" bedeutet, daß im Grenzfall unendlich vieler zufälliger Messungen der Inhomogenität für eine gegebene Auflösung ein Grenzwert erreicht wird, welcher von der Auflösung unabhängig ist.

<sup>3</sup> Zur Berechnung der Quantile siehe Algorithmus in Anhang C.

variable, entlang der Abszisse aufgetragen. Die relative Häufigkeit ihrer Realisierung ist als Ordinate aufgetragen; sie geht im Grenzfalle verschwindender Detektorfläche und unendlich vieler Messungen in eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion über, welche durch die Intensitätsverteilung eindeutig bestimmt ist<sup>1</sup>. Das Maximum dieser Dichtefunktion gibt den Erwartungswert für die Intensität an.

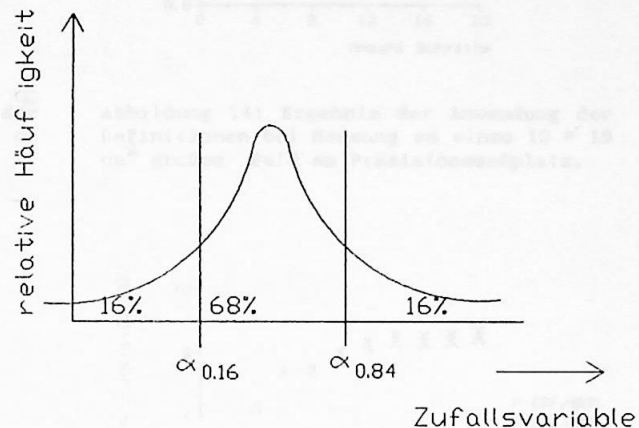


Abbildung 12: Charakterisierung der Breite einer Verteilung durch Quantile.

Die Abhängigkeit der Definitionen von der Auflösung habe ich wie folgt untersucht: An zwei verschiedenen typischen Intensitätsverteilungen - der Intensitätsverteilung des Präzisionsmeßplatzes für Einfachzellen und der Intensitätsverteilung unter einer Anordnung von 9 Halogenlampen (unteres Halogenlampenfeld des Mehrquellensimulators, vergleiche Abbildungen 19 und 37) - ist jeweils mit verschiedenen Schrittweiten (0.5 cm bis 2.5 cm) eine 10 cm lange Zeile und ein 10 \* 10 cm<sup>2</sup> großes Feld mit einem ca. 0.8 \* 0.8 cm<sup>2</sup> großem Detektor abgerastert worden. Am Präzisionsmeßplatz für Einfachzellen wurde dabei zusätzlich der Kurzschlußstrom einer nahe der Testebene fest montierten Solarzelle gemessen und damit die Intensitätsschwankungen der Lichtquelle korrigiert. Das Ergebnis zeigen die Abbildungen 13-16:

<sup>1</sup> Woraus folgt, daß für eine präzise Bestimmung der Eigenschaften dieser Dichtefunktion ein möglichst kleiner Detektor zu nehmen ist.

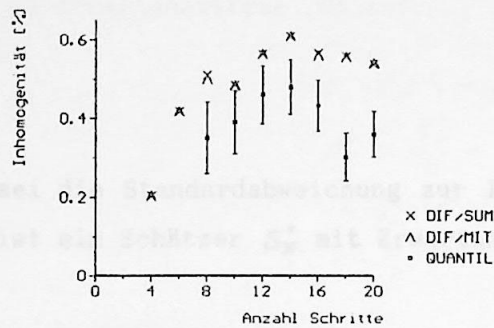


Abbildung 13: Ergebnis der Anwendung der Definitionen bei Messung an einer 10 cm langen Zeile am Präzisionsmeßplatz.

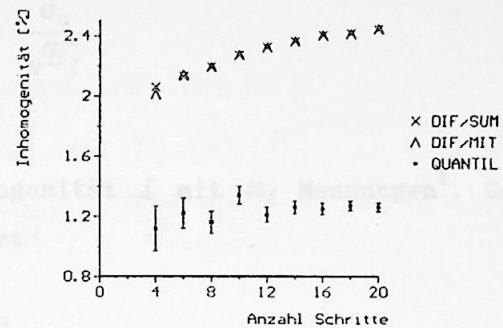


Abbildung 14: Ergebnis der Anwendung der Definitionen bei Messung an einem 10 \* 10 cm<sup>2</sup> großem Feld am Präzisionsmeßplatz.

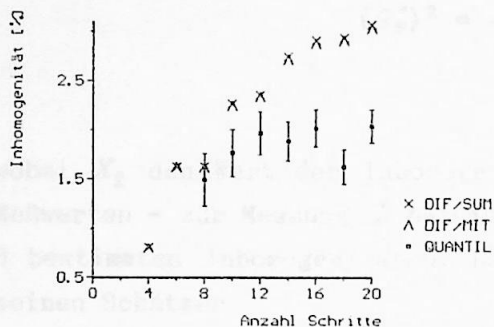


Abbildung 15: Ergebnis der Anwendung der Definitionen bei Messung an einer 10 cm langen Zeile unter 9 Halogenlampen.

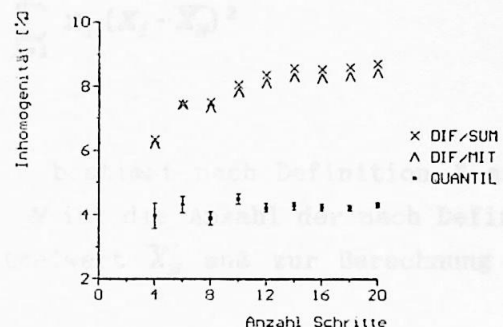


Abbildung 16: Ergebnis der Anwendung der Definitionen bei Messung an einem 10 \* 10 cm<sup>2</sup> Feld unter 9 Halogenlampen.

Die Bezeichner DIF/SUM, DIF/MIT und QUANTIL stehen für die Definitionen 1, 2 und 3. Ich interpretiere die Daten folgendermaßen:

- Die Definitionen 1 und 2 stimmen im Ergebnis weitgehend überein, was auf eine Symmetrie der Extremwerte um den Mittelwert der Verteilungen zurückzuführen ist.
- Das Ergebnis der Definitionen 1 und 2 hängt von der Schrittzahl ab, da die Extremwerte abhängig von der Schrittzahl gefunden werden.
- Die dritte Definition ist im Erwartungswert unabhängig von der Schrittzahl; die Vertrauensintervalle werden mit zunehmender Anzahl Meßdaten kleiner.

Zu den Ergebnissen der dritten Definition habe ich die 68% Vertrauensintervalle wie folgt bestimmt:

Als Fehlermodell zu den Meßwerten nehme ich an,

$$\sigma_i = \frac{\sigma_0}{\sqrt{n_i}} \quad (1)$$

sei die Standardabweichung zur Inhomogenität  $i$  mit  $n_i$  Messungen<sup>1</sup>. Gesucht ist ein Schätzer  $S_N^*$  mit Erwartungswert

$$\langle S_N^* \rangle = \sigma_0 \quad (2)$$

Ein solcher Schätzer ist gegeben durch:

$$(S_N^*)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N n_i (X_i - \bar{X}_N)^2 \quad (3)$$

wobei  $X_i$  den Wert der Inhomogenität - bestimmt nach Definition 3 aus  $n_i$  Meßwerten - zur Messung  $i$  bezeichnet.  $N$  ist die Anzahl der nach Definition 3 bestimmten Inhomogenitäten. Der Mittelwert  $\bar{X}_N$  muß zur Berechnung durch seinen Schätzer

$$\hat{X}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (4)$$

ersetzt werden<sup>2</sup>.

Beweis: Zu zeigen ist Gleichung 2, d.i.  $S_N^*$  ist "erwartungstreu". Außerdem ist zu zeigen

$$\text{Var}((S_N^*)^2) \rightarrow 0; \quad N \rightarrow \infty \quad (5)$$

d.h.  $(S_N^*)^2$  und somit  $S_N^*$  ist "konsistent".

<sup>1</sup> Dies ist der Schätzer der Standardabweichung des Mittelwerts. Zur Motivation sei angemerkt, daß der Schätzer aus rechentechnischen Gründen eine Potenz in  $n_i$  sein sollte.

<sup>2</sup> Eine genaue Analyse - d.i. Berücksichtigung der Abweichung des Schätzers des Mittelwerts von seinem wahren Wert - führt zur Studentischen t-Verteilung.



a) Erwartungstreue: Es ist

$$\begin{aligned} \langle (X_i - \bar{X}_N)^2 \rangle &= \langle ((X_i - \langle X \rangle) - (\bar{X}_N - \langle X \rangle))^2 \rangle \\ &= \sigma_i^2 + \frac{\sigma_i^2}{N} - 2 \langle ((X_i - \langle X \rangle) (\bar{X}_N - \langle X \rangle)) \rangle \\ &= \sigma_i^2 \left( 1 + \frac{1}{N} - \frac{2}{N} \right) = \frac{N-1}{N} \sigma_i^2 \end{aligned}$$

Somit ist

$$\langle (S_N^*)^2 \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N n_i \frac{N-1}{N n_i} \sigma_i^2 = \sigma_0^2$$

Mit

$$\text{Var} ((S_N^*)^2) = \langle (S_N^*)^2 \rangle - \langle S_N^* \rangle^2 \rightarrow 0; \quad N \rightarrow \infty$$

folgt die Behauptung (Gleichung 2).

b) Konsistenz:

Aus der Literatur (z.B./39/) ist bekannt, daß

$$(S_N^*)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_N)^2$$

(6)

ein Schätzer für die Varianz unter Annahme konstanter Fehler ist. Ist  $n_i$  beschränkt, so folgt daraus unmittelbar die Konsistenz von  $S_N^*$ .

Aus  $\sigma_0$  läßt sich für jedes  $n_i$  das zugehörige Vertrauensintervall berechnen. In den Abbildung 13 bis 16 habe ich die zugehörigen Vertrauensintervalle eingetragen. Die Tabelle zeigt das Ergebnis der Datenanalyse:

	$\hat{X}_N$	$\sigma_0$	$\sigma_0 / \hat{X}_N$
10 cm Zeile , Abb. 13	0.40 %	0.26 %	0.65
100 cm <sup>2</sup> Feld, Abb. 14	1.23 %	0.59 %	0.48
10 cm Zeile , Abb. 15	1.82 %	0.75 %	0.41
100 cm <sup>2</sup> Feld, Abb. 16	4.21 %	1.58 %	0.38

Tabelle 7: Bestimmung der Inhomogenität nach Definition 3.

Die Güte des Fehlermodells lässt sich aus den Abbildungen 13 - 16 folgendermaßen beurteilen: 68% der Fehlerbalken - also etwa 3 von 4 - müssen sich mit einer Geraden entlang des Mittelwerts schneiden. Man erkennt anhand der Abbildungen mit dem Auge, daß das angenommene Fehlermodell die Meßunsicherheiten vernünftig beschreibt<sup>1</sup>.

Bei Vorgabe eines Vertrauensintervalles läßt sich mit  $\sigma_0$  aus der Tabelle und dem Fehlermodell die notwendige Anzahl der Messungen in der Testebene berechnen. Bei der in unserem Labor üblichen Rasterung einer  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  großen Testebene in 1 cm Schritten beträgt die relative Meßunsicherheit in der Messung der Inhomogenität des Präzisionsmeßplatzes nach Definition 3 nur ca. 5% (Tabelle 7:  $n_1 = 100$ , somit  $\sigma_1 = 0.48/\sqrt{100} \approx 0.05$ ).

Obwohl die IEC-Definition in der Praxis leichter anzuwenden ist<sup>2</sup> gebe ich zu bedenken, die IEC-Definition durch die mathematisch und physikalisch einschichtige Definition 3 zu ersetzen. Man muß sich bei weiterer Verwendung der IEC-Definition jedenfalls im klaren sein, daß bei Verwendung dieser Definition stets die Rasterung der Testebene mit angegeben werden muß. Die Tabelle 8 stellt nochmals Vor- und Nachteile der beiden Definitionen gegenüber:

	Vorteile	Nachteile
IEC-Definition (Definition 1.)	Leicht zu messen. Auswertung einfach.	Kein "Schätzer" im Sinn der statistischen Datenanalyse. Meßwert hängt von der Auflösung ab.
Definition 3. ("QUANTIL")	Erwartungstreuer und konsistenter Schätzer für die Breite einer Verteilung.	Auswertung nur mit Rechner möglich. Noch kein Standard.

Tabelle 8: Vor- und Nachteile der Inhomogenitätsdefinitionen.

<sup>1</sup> Eine mehr quantitative Analyse lässt sich als sogenannter "Hypothesentest" durchführen; siehe auch hierzu /39/.

<sup>2</sup> Minimale und maximale Werte lassen sich mit modernen Meßgeräten mit Spitzenwertfunktion leicht messen.

4. Goldschnitt-Versuchsplan:  
Experimenteller Versuchsplan zur Bestimmung  
des Punktes maximaler Leistung

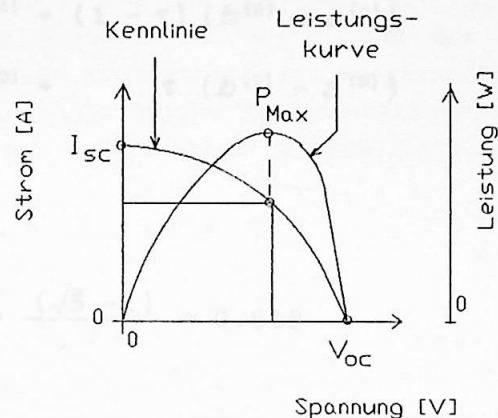


Abbildung 17: Kennlinie und zugehörige Leistungskurve einer Solarzelle.

Sind die Standardbezugsbedingungen erreicht, besteht die Aufgabe in der möglichst präzisen Bestimmung des Punktes maximaler Leistung. Es ist daher sinnvoll, nicht die Kennlinie der Solarzelle sondern deren Leistungskurve zu betrachten (siehe Abbildung 17, vergleiche auch Abbildung 3, Seite 3). Ziel ist es, die Meßpunkte so zu wählen, daß die statistische Meßunsicherheit in der Bestimmung des Punktes maximaler Leistung minimal wird; die Reproduzierbarkeit der Messung somit optimiert wird. Eine Meßstrategie hierzu nennt man einen "statistischen, experimentellen Versuchsplan"; Statistisch deshalb, weil die Meßunsicherheiten als Verteilungsfunktionen von Zufallsvariablen - den Meßwerten - angenommen werden und experimentell deshalb, weil die Zufallsvariablen durch Experiment realisiert werden<sup>1</sup>. Ziel des Versuchsplans ist also, den Punkt maximaler Leistung einzukreisen und zufällige Meßunsicherheiten zu minimieren. Dies erreiche ich durch Intervallschachtelung und wiederholte Messung wie folgt:

<sup>1</sup> Ohne den Leser abschrecken zu wollen: Ich verwende die Terminologie der Stochastik der Kürze der Formulierung wegen. Zur Theorie der Versuchsplanung siehe z.B. C.K.Bayne, J.B.Rubin, "Practical Experimental Designs and Optimization Methods for Chemists" (Literaturangabe aus der Vorlesung SS 91, Prof. Honerkamp).

Das Maximum der Leistungskurve werde in einem Intervall  $(a, b)$  vermutet<sup>1</sup>.

Sei

$$\begin{aligned} x_1^{(0)} &= a^{(0)} + (1 - \tau) (b^{(0)} - a^{(0)}) \\ x_2^{(0)} &= a^{(0)} + \tau (b^{(0)} - a^{(0)}) \end{aligned} \quad (1)$$

mit dem "goldenen Schnitt"

$$\tau = \frac{(\sqrt{5} - 1)}{2} \approx 0.618 \quad (2)$$

Dann wird an den Stellen  $a^{(0)}$ ,  $b^{(0)}$ ,  $x_1^{(0)}$  und  $x_2^{(0)}$  gemessen. Die Meßwerte sind

$$f(a^{(0)}) \quad f(b^{(0)}) \quad f(x_1^{(0)}) \quad f(x_2^{(0)})$$

Die folgende Vorschrift bildet eine Intervallschachtelung für das Maximum /40/:

	falls $f(x_2^{(i)}) < f(x_1^{(i)})$	falls $f(x_2^{(i)}) \geq f(x_1^{(i)})$
$a^{(i+1)} =$	$a^{(i)}$	$x_1^{(i)}$
$b^{(i+1)} =$	$x_2^{(i)}$	$b^{(i)}$
$x_1^{(i+1)} =$	$a^{(i)} + (1 - \tau) (x_2^{(i)} - a^{(i)})$	$x_2^{(i)}$
$x_2^{(i+1)} =$	$x_1^{(i)}$	$b^{(i)} - (1 - \tau) (b^{(i)} - x_1^{(i)})$
Neu zu messen :	$f(x_1^{(i+1)})$	$f(x_2^{(i+1)})$

Goldener-Schnitt-Algorithmus.

Dieser Algorithmus benötigt zum Einschachteln des Maximums mit gleicher Genauigkeit höchstens einen Schritt mehr als der bezüglich der Schrittzahl optimale, aber ansonsten komplizierte Fibonacci-Algorithmus /40/.

<sup>1</sup> Etwa zwischen  $I_{sc}$  und  $V_{oc}$ .



Da die Meßwerte mit Unsicherheiten belegt sind, kann das Maximum durch den Goldenen-Schnitt-Algorithmus nicht beliebig genau aufgelöst werden. Ein mögliches "Auflösungskriterium" für die Bestimmung des Maximums wird in Abbildung 18 illustriert:

Das obere Ende des 68% Konfidenzintervalls des linken Meßwertes liege auf gleicher Höhe mit dem unteren Ende des 68% Konfidenzintervalls (Standardabweichung) des Maximums. Die Wahrscheinlichkeit, daß der Messwert des Maximums höher liegt als der linke Meßwert ist das Komplement zu dem Fall, daß der Meßwert des Maximums unterhalb seines Konfidenzintervalles liegt und der linke Meßwert oberhalb seines Konfidenzintervalles liegt, also

$$P = 1 - (0.16)^2 \approx 97\% \quad (3)$$

Liegen die Meßwerte wie in Abbildung 18, so ist dies in guter Näherung<sup>1</sup> die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden des Maximums aus den Meßwerten. Die Konfidenzintervalle lassen sich aus mehreren Messungen am selben Punkt mit dem Schätzer  $S_N$  berechnen<sup>2</sup> (vergleiche Abschnitt III.3., Gleichung (6), Seite 27). Das 68% Konfidenzintervall für den Mittelwert wird mit zunehmender Anzahl Messungen immer kleiner entsprechend

$$\sigma_{\bar{x}_N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sigma_x \quad (4)$$

mit  $\sigma_{\bar{x}_N}$  als 68% Konfidenzintervall zum Mittelwert  $\bar{x}_N$  zu  $N$  Meßwerten und  $\sigma_x$  als 68% Konfidenzintervall zum Einzelwert.

Daraus leite ich folgenden Versuchsplan ab: Die Spannungswerte sind nach dem oben beschriebenen Goldschnitt-Algorithmus zu setzen, wobei als Meßwert nicht die Einzelwerte, sondern Mittelwerte zu nehmen sind. Als Auflösungskriterium für das Maximum nehme ich den in Abbildung 18 beschriebenen Fall. Die Anzahl der Messungen pro Meßpunkt ist hierbei durch die folgende Forderung an das 68% Vertrauensintervall der Mittelwerte festgelegt:

$$2 \sigma_{\bar{x}_N} \leq \text{Min}(f(x_1), f(x_2)) - \text{Max}(f(a), f(b)) \quad (5)$$

Der Ausdruck auf der rechten Seite wird mit abnehmender Intervalllänge immer

<sup>1</sup> Unter Vernachlässigung der Konfidenzintervalle aller weiteren Meßwerte.

<sup>2</sup> Schätzung der Standardabweichung aus mehreren Messungen.

kleiner werden<sup>1</sup>. Man gebe ein maximales  $N$  vor; Das Verfahren ist konvergiert, wenn Gleichung 5 nicht mehr erfüllt werden kann. Zur Bestimmung der Konfidenzintervalle müssen zu jeder Meßstelle eine Mindestzahl (z.B. 5) Messungen gemacht werden. In der Praxis sollte daher das Startintervall  $(a, b)$  nicht zu groß gewählt werden, um eine unnötig lange Meßzeit zu vermeiden<sup>2</sup>.

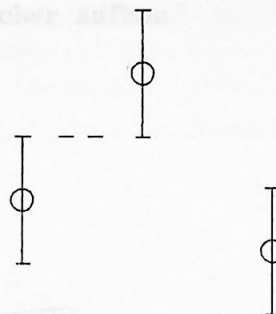


Abbildung 18: Auflösungskriterium für die Bestimmung eines Maximums.

Die Merkmale dieses Versuchsplans sind:

- Hohe Geschwindigkeit: Die Berechnung des nächsten Meßpunkts geht sehr viel schneller als eine Messung selbst<sup>3</sup>.
- Potential sehr hoher Genauigkeit: Bei maximal 25 Messungen pro Meßpunkt kann die Reproduzierbarkeit um einen Faktor 5 verbessert werden.
- Optimierung der Meßzeit durch Kontrolle der Meßunsicherheiten.
- Am Ende der Kennlinienmessung läßt sich neben dem Meßwert für den Punkt maximaler Leistung außerdem das Vertrauensintervall für die Reproduzierbarkeit angeben.

Anmerkungen:

- Der Versuchsplan stellt einen konsistenten, erwartungstreuen Schätzer für den Punkt maximaler Leistung dar (vergleiche vorgehender Abschnitt III.3.).
- Der Versuchsplan ist den in /41/ beschriebenen Fit-Methoden bezüglich Geschwindigkeit und Meßgenauigkeit überlegen.

<sup>1</sup> Tritt der Fall ein, daß das Maximum nicht aufgelöst wird (Wahrscheinlichkeit pro Schritt: 3%), wird der Ausdruck auf der rechten Seite von Gleichung (5) negativ. Das Verfahren muß dann neu gestartet werden.

<sup>2</sup> Eine geeignete Wahl des Startintervalls kann durch eine erste, "grobe" Bestimmung des Maximums durch Einzelmessungen getroffen werden.

<sup>3</sup> Ordnungsrelationen ( $<$ ,  $>$ , ...) werden im Meßplatzrechner durch wenige Prozessorzyklen (Prozessorfrequenz: 16 MHz) entschieden, die Berechnungsfrequenz liegt somit im kHz-Bereich. Die Meßfrequenz dagegen beträgt nur ca. 3 Hz.

## 5. Beschreibung der Apparatur:

### Mehrquellen-Solarsimulator mit variierbarem Spektrum

#### 5.1. Mechanischer und elektrischer Aufbau

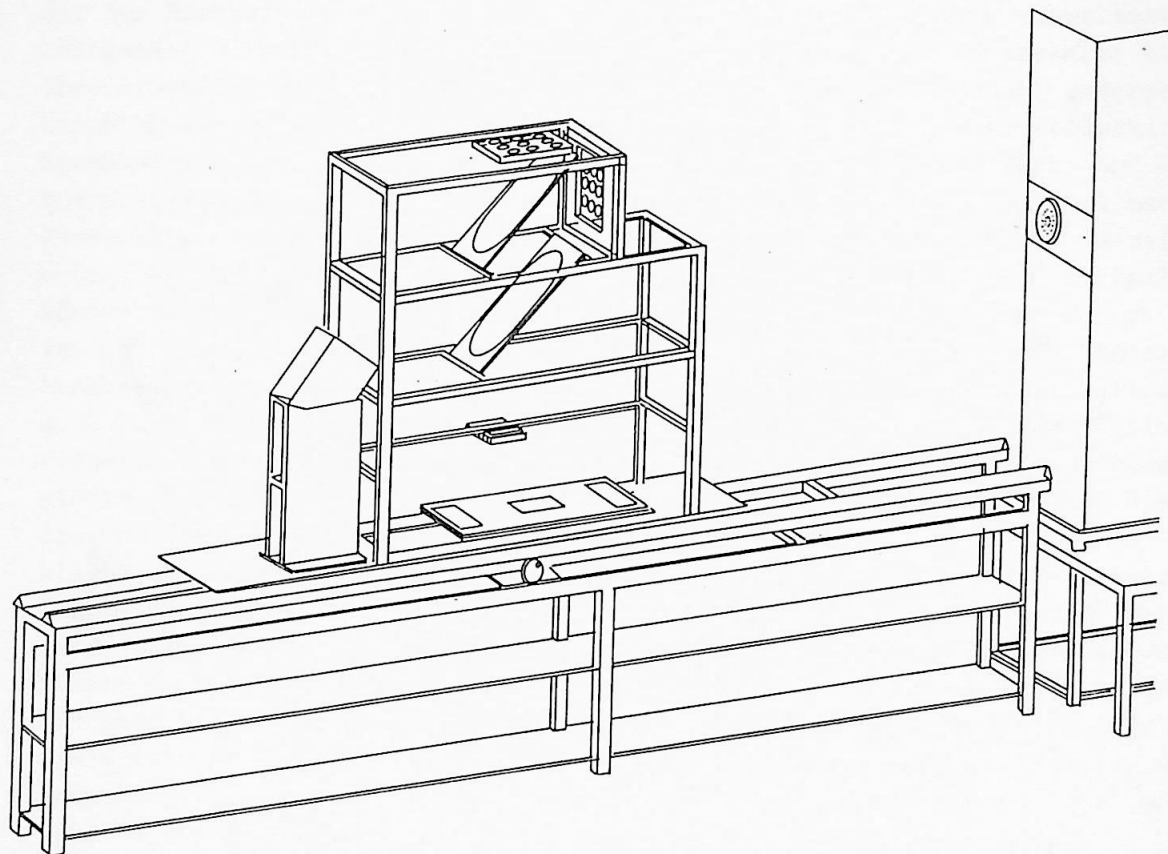


Abbildung 19: Mechanischer Aufbau des Mehrquellensolarsimulators.

Zeichnung: H.Trefzer

Die Abbildung 19 ist aus meinen Werkstattplänen für das Spiegelgehäuse entstanden. Die beiden ellipsenförmig ausgefrästen Spiegelhalter können zum Austausch der Spiegel nach Abnahme der Halogenlampenfelder von oben herausgenommen werden. Der schräg gestellte Kasten links des Spiegelhauses ist ein Spektralradiometer, wie es zur Freilandvermessung von Geophysikern eingesetzt wird. Über der Testebene befindet sich an einer Querstange befestigt die Sensoreinheit der gefilterten Solarzellen. Rechts auf dem Podest steht das Xenonlampenhaus, ein 20 Jahre alter Xenonsolarsimulator von dem ich nur noch die optischen Komponenten verwenden habe können.

Die Abbildung 20 zeigt den Aufbau zur Kennlinienmessung von Mehrfachsolarzellen. In die Testebene ist ein goldbeschichteter Meßblock eingelassen, der den Rückseitenkontakt der Solarzelle bei der Messung über eingelassene Luftkanäle mithilfe einer Pumpe ansaugt. Die Spannung der Solarzelle wird über einen eigenen Stromkreislauf mit einem hochohmigen Meßgerät gemessen. Durch diese sogenannte "Vierleitermeßtechnik" vermeidet man fehlerhafte Spannungsmessung durch Spannungsabfall an den Zuleitungen /42/. Für die Spannungsmessung ist im Meßblock eine Kontaktscheide mit verstellbarer Andruckkraft eingelassen. Die Anschlüsse an der Oberseite der Solarzelle werden mit Kontakten am Rand der Testebene verbunden. Bis zu drei Teilzellen können einzeln kontaktiert werden. Der maximal zulässige Strom beträgt 20 Ampère<sup>1</sup>. Am Rand der Testebene befinden sich ferner Anschlüsse zur Temperaturmessung und Anschlüsse für Referenzelemente. Nahe der Solarzelle befinden sich Pt100 Widerstandsthermometer, mit deren Hilfe der Meßblock über Peltierelemente temperiert wird<sup>2</sup>. Die entstehende Wärme wird mit einem Kühlthermostaten abgeführt. Das in die Testebene einfallende Spektrum wird mit einem Spektralradiometer gemessen. Für schnelle Messungen im roten, grünen und blauen Bereich des Spektrums befinden sich ferner gefilterte Solarzellen ("RGB-Sensoren") über der Testebene. Die Testebene kann bis zu 100 mm in ihrer Höhe verstellt werden. Das ist notwendig, um die unterschiedlichen Dicken von Referenzelementen und Testelementen zu kompensieren<sup>3</sup>. Bis zu drei Vierquadrantennetzgeräte können die p-n Übergänge einzeln durch ihre Kennlinie fahren. Ein von mir eigens hierfür entwickelter Meßbereichsumschalter ermöglicht die Wahl geeigneter Widerstände zur Strommessung und die Überprüfung der Kontakte an der Solarzelle<sup>4</sup>. Strom und Spannung an der Solarzelle und das Signal eines der Sensoren können gleichzeitig mithilfe dreier Digitalmultimeter gemessen werden. Schwankungen der Lichtintensität<sup>5</sup> können somit überwacht und gegebenenfalls kompensiert werden. Die Temperatur des

---

<sup>1</sup> Ein späterer Ausbau der Apparatur für konzentriertes Sonnenlicht und daraus folgende hohe Ströme sind dadurch berücksichtigt.

<sup>2</sup> Zum Peltiereffekt siehe z.B. C.Gerthsen, Physik, Springer Berlin Göttingen Heidelberg, (1958).

<sup>3</sup> Der große Verstellweg von 10 cm erlaubt diese Kompensation auch für Mini-Module.

<sup>4</sup> Siehe Anhang D.

<sup>5</sup> Besonders die Xenonlampe kann durch Unregelmäßigkeiten im Lichtbogen (Wandern, Springen) solche Schwankungen hervorrufen.



Meßblockes oder, falls möglich, der Solarzelle wird ebenfalls gemessen. Ein Rechner verbindet die Komponenten zur U-I Messung miteinander. Er steuert den Meßablauf, berechnet auf der Suche nach den Standardbezugsbedingungen die Ströme der Referenzelemente für die jeweils nächste Einstellung und liest die Messdaten ein. Der höhenverstellbare Meßtisch mit dem eingebauten Meßblock ist eine Sonderanfertigung der Firma OWIS, Staufen, die von Herrn Dipl.Ing. Siegfried Kunzelmann und mir spezifiziert worden ist.

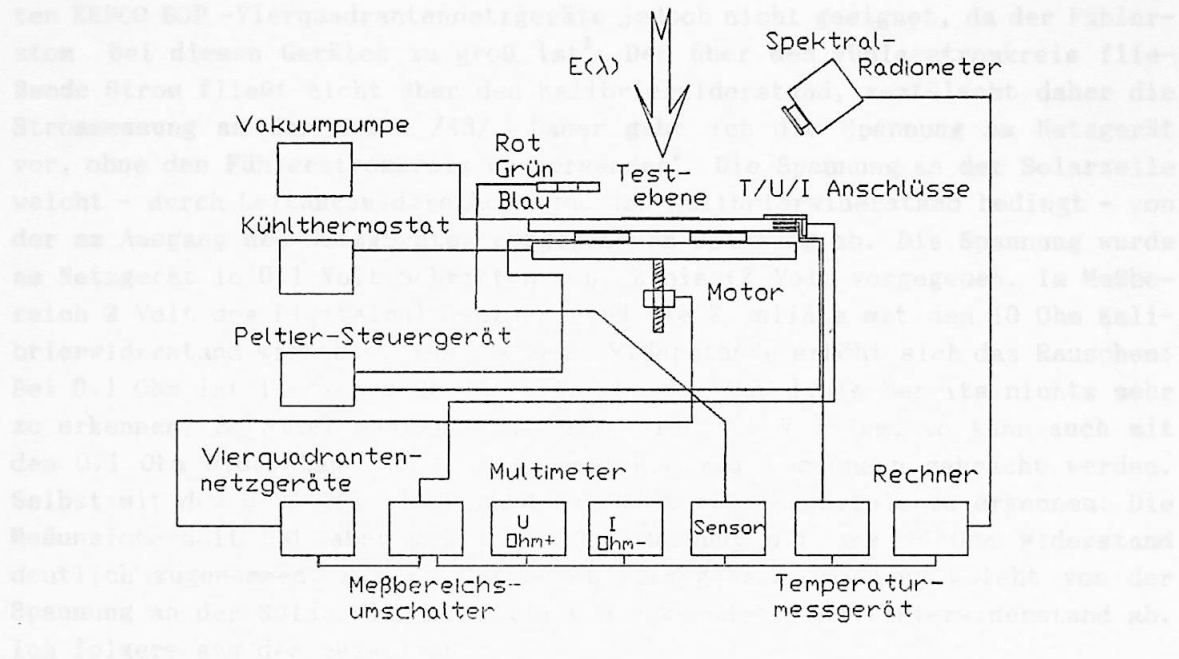


Abbildung 20: Blockschaltbild zum Messplatz.

Die Tabelle 9 zeigt die Daten der Kalibrierwiderstände, die zur Messung der Ströme der Solarzellen verwendet werden. Der Schaltplan zur Strommessung ist in Anhang D angegeben.

Alle Kalibrierwiderstände sind in Vierleitertechnik ausgeführt und bei 23°C mit < 0,5 Watt Belastung auf ihren Nennwert abgeglichen (Herstellerangaben).

Widerstandswert [Ohm]	Temperaturkoeffizient	Toleranz in %	Maximaler Strom [A]
0.001	10 <sup>-5</sup> / °C	0.05	30
0.01	10 <sup>-5</sup> / °C	0.03	14
0.1	10 <sup>-5</sup> / °C	0.02	5
1	10 <sup>-6</sup> / °C	0.02	1.5
10	10 <sup>-6</sup> / °C	0.02	0.5
100	10 <sup>-6</sup> / °C	0.02	0.15

Tabelle 9: Daten der Kalibrierwiderstände nach Herstellerangaben.

Die Abbildungen 21 und 22 zeigen die ersten Kennlinienmessungen einer Solarzelle mit verschiedenen Kalibrierwiderständen von 0.01 Ohm bis 100 Ohm. Zum Durchfahren der Kennlinie mit den Vierquadrantennetzgeräten muß für jeden Meßpunkt die Spannung vorgegeben werden. Das Gerät kann über einen Fühlerstromkreislauf die Spannung direkt an der Solarzelle messen. Für eine exakte Strommessung ist dieses Verfahren ("Vierleitertechnik") im Fall der verwendeten KEPCO BOP -Vierquadrantennetzgeräte jedoch nicht geeignet, da der Fühlerstrom bei diesen Geräten zu groß ist<sup>1</sup>: Der über den Fühlerstromkreis fließende Strom fließt nicht über den Kalibrierwiderstand, verfälscht daher die Strommessung an der Zelle /43/. Daher gebe ich die Spannung am Netzgerät vor, ohne den Fühlerstromkreis zu verwenden<sup>2</sup>. Die Spannung an der Solarzelle weicht - durch Leitungswiderstände und den Kalibrierwiderstand bedingt - von der am Ausgang des Netzgerätes vorgegebenen Spannung ab. Die Spannung wurde am Netzgerät in 0.1 Volt Schritten von -2 bis +2 Volt vorgegeben. Im Meßbereich 2 Volt des Digitalmultimeters wird die Kennlinie mit dem 10 Ohm Kalibrierwiderstand sichtbar. Für kleinere Widerstände erhöht sich das Rauschen: Bei 0.1 Ohm ist in diesem Messbereich von der Kennlinie bereits nichts mehr zu erkennen. Schaltet man auf den Meßbereich 0.2 Volt um, so kann auch mit dem 0.1 Ohm Widerstand noch eine Kennlinie zum Vorschein gebracht werden. Selbst mit dem 0.01 Ohm Widerstand ist noch eine Kennlinie zu erkennen. Die Meßunsicherheit hat aber gegenüber der Messung mit dem 10 Ohm Widerstand deutlich zugenommen. Die am Netzgerät vorgegebene Spannung weicht von der Spannung an der Solarzelle abhängig vom verwendeten Kalibrierwiderstand ab. Ich folgere aus den Messungen:

- Die Wahl eines geeigneten Kalibrierwiderstands und Meßbereichs muß für Präzisionsmessungen sorgfältig vorgenommen werden.
- Um die Spannung an der Solarzelle definiert vorgeben zu können, muß die Spannung an der Solarzelle durch ein externes Meßgerät kontrolliert, und die Vorgabe am Netzgerät nachgeführt werden<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Nach Erfahrungen am Dunkelkennlinienmeßplatz des Labors, wo ebenfalls ein KEPCO BOP -Vierquadrantennetzgerät verwendet wird.

<sup>2</sup> Siehe Abbildung 2, Seite 3.

<sup>3</sup> Engl. "Tracking". Die Spannung an der Solarzelle kann hierzu über das Digitalmultimeter "U" (siehe Abbildung 66) gemessen werden.

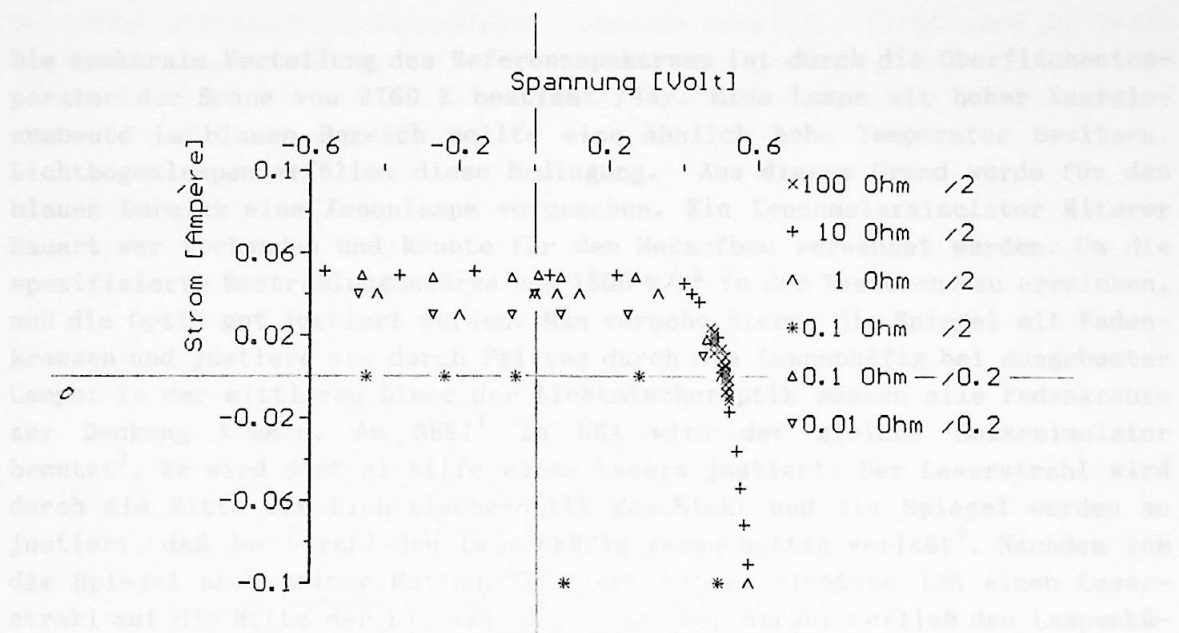


Abbildung 21: Messung mit verschiedenen Kalibrierwiderständen und in verschiedenen Meßbereichen.

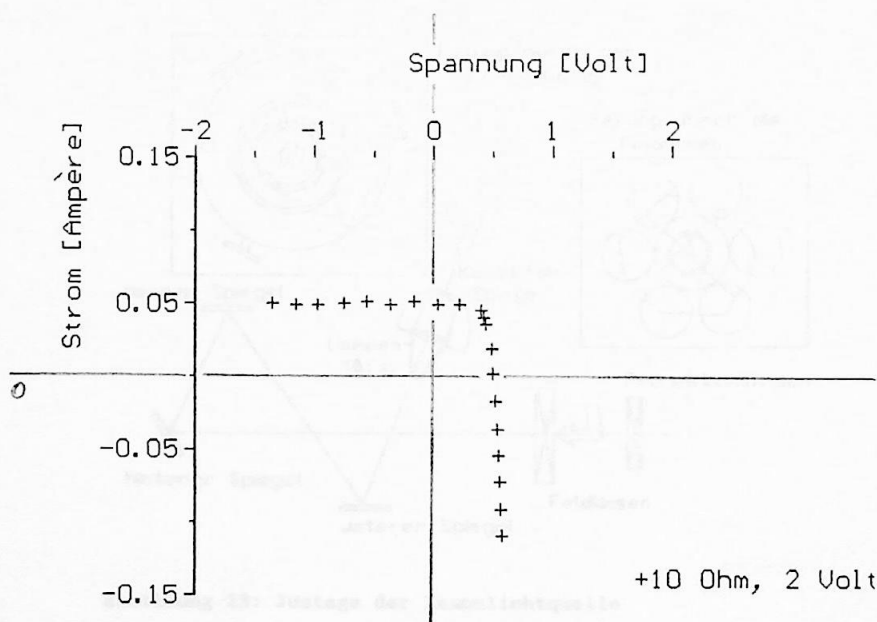


Abbildung 22: Messung mit 10 Ohm im 2 V Meßbereich des Digitalmultimeters.

## 5.2. Lampen und Optik

Die spektrale Verteilung des Referenzspektrums ist durch die Oberflächentemperatur der Sonne von 5760 K bestimmt /44/. Eine Lampe mit hoher Energieausbeute im blauen Bereich sollte eine ähnlich hohe Temperatur besitzen. Lichtbogenlampen erfüllen diese Bedingung. Aus diesem Grund wurde für den blauen Bereich eine Xenonlampe vorgesehen. Ein Xenonsolarsimulator älterer Bauart war vorhanden und konnte für den Meßaufbau verwendet werden. Um die spezifizizierte Bestrahlungsstärke von  $1500 \text{ W/m}^2$  in der Testebene zu erreichen, muß die Optik gut justiert werden. Man versehe hierzu die Spiegel mit Fadenkreuzen und justiere sie durch Peilung durch den Lampenkäfig bei ausgebauter Lampe: In der mittleren Linse der Lichtmischeroptik müssen alle Fadenkreuze zur Deckung kommen. Am SERI<sup>1</sup> in USA wird der gleiche Solarsimulator benutzt<sup>2</sup>. Er wird dort mithilfe eines Lasers justiert: Der Laserstrahl wird durch die Mitte der Lichtmischeroptik geschickt und die Spiegel werden so justiert, daß der Strahl den Lampenkäfig genau mittig verläßt<sup>3</sup>. Nachdem ich die Spiegel nach meiner Methode justiert hatte, richtete ich einen Laserstrahl auf die Mitte der Lichtmischeroptik: Der Strahl verließ den Lampenkäfig exakt mittig. Nach Einbau der Lampe wird die Lampe lateral auf optimale Homogenität und vertikal auf maximale Intensität in der Testebene justiert. Die spezifizierten  $1500 \text{ W/m}^2$  sind erreicht worden<sup>4</sup>. Die Lichtmischeroptik läßt sich ebenfalls durch Peilung justieren (siehe Abbildung 23: Die Ausschnitte zeigen Aufsichten an den mit Pfeilen markierten Stellen).

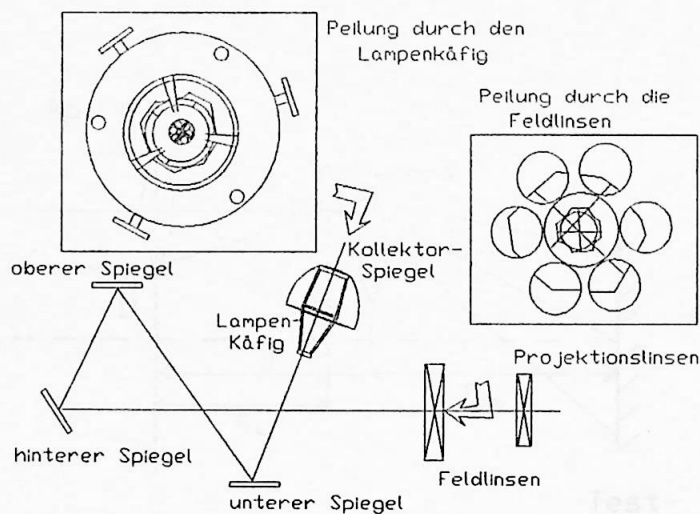


Abbildung 23: Justage der Xenonlichtquelle

<sup>1</sup> Solar Energie Research Institute, Golden, Colorado.

<sup>2</sup> siehe K.Heidler, Reisebericht USA, (1990).

<sup>3</sup> Sofern ein Laser vorhanden ist, ist dies eine einfache Methode.

<sup>4</sup> Zu Beginn der Arbeit betrug die Bestrahlungsstärke in der Meßebene lediglich  $800 \text{ W/m}^2$ .



Das Funktionsprinzip der Lichtmischeroptik ist in Abbildung 24 skizziert: Das vom parabolischen Kollektorspiegel kommende parallele Licht wird in Teilstrahlen zerlegt und in der Testebene wieder gemischt. Dadurch wird die räumliche Variation der Intensität im Lichtstrahl hinter dem Parabolspiegel zum großen Teil ausgeglichen.

Das Strahlengangsschema zeigt die optische Anordnung. Parallel einfallende Lichtstrahlen werden durch eine Feldlinse (FL) in Teilstrahlen zerlegt. Diese Strahlen werden durch eine Projektionslinse (PL) wieder gemischt und treffen auf eine Testebene. Die Testebene ist mit einer Höhe von 30 cm markiert. Der Abstand zwischen der Feldlinse und der Projektionslinse ist mit 240 cm angegeben. Die Brennweite der Feldlinse ist mit  $f_{FL}$  und die Brennweite der Projektionslinse mit  $f_{PL}$  bezeichnet. Der Strahlengang ist als "nicht maßstabstreu" gekennzeichnet.

Abbildung 24: Funktionsweise der Lichtmischeroptik.

Die Abbildung zeigt den Strahlengang von der Feldlinse (FL) über die Projektionslinse (PL) zur Testebene. Die Testebene ist mit einer Höhe von 30 cm markiert. Der Abstand zwischen der Feldlinse und der Projektionslinse ist mit 240 cm angegeben. Die Brennweite der Feldlinse ist mit  $f_{FL}$  und die Brennweite der Projektionslinse mit  $f_{PL}$  bezeichnet. Der Strahlengang ist als "nicht maßstabstreu" gekennzeichnet.

Das Strahlengangsschema zeigt die optische Anordnung. Parallel einfallende Lichtstrahlen werden durch eine Feldlinse (FL) in Teilstrahlen zerlegt. Diese Strahlen werden durch eine Projektionslinse (PL) wieder gemischt und treffen auf eine Testebene. Die Testebene ist mit einer Höhe von 30 cm markiert. Der Abstand zwischen der Feldlinse und der Projektionslinse ist mit 240 cm angegeben. Die Brennweite der Feldlinse ist mit  $f_{FL}$  und die Brennweite der Projektionslinse mit  $f_{PL}$  bezeichnet. Der Strahlengang ist als "nicht maßstabstreu" gekennzeichnet.

Abbildung 25: Funktionsweise der Lichtmischeroptik.

Abbildung des projektiven Strahlungsfeldes in der messtechnischen durch die Apertur des vollen Strahlungsfeldes. Nach Verteilung an einem mit einem Photopapier.

Abbildung 25 zeigt das optische Prinzip: Die Feldlinsen ("FL") fangen das durch Aperturen ("Ap") begrenzte Lichtfeld ein und bilden es auf die Projektionslinsen ("PL") ab. Dies verhindert eine Vignettierung<sup>1</sup> des Strahlungsfeldes. Die äußeren Projektionslinsen sind näher an der optischen Achse der Lichtmischeroptik angeordnet, als die zugehörigen Feldlinsen. Der Strahlengang wird so geknickt, daß sich in der Testebene die Beiträge aller Feldlinsen überlagern. Die "Simulatorbrennweite"  $f_{sim}$  (ca. 2.40 m) hängt nur von der Versetzung der Projektionslinsen gegenüber den Feldlinsen ab. Die Ausleuchtung der Projektionslinsen durch die Feldlinsen ist durch den Abstand  $d$  und durch die Brennweite der Feldlinsen  $f_{FL}$  bestimmt. Der Durchmesser der ausgeleuchteten Fläche in der Testebene hängt nur noch von der Brennweite der Projektionslinse  $f_{PL}$  ab, sofern die Projektionslinsen maximal ausgeleuchtet sind. Ich folgere daraus: Eine Vergrößerung der beleuchteten Testebene von derzeit 30 cm Durchmesser auf ca. 45 cm Durchmesser, wie sie zur Messung von  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  großen Mini-Modulen gefordert notwendig wäre, ist nur durch einen kompletten Umbau oder einen Verzicht auf die Lichtmischeroptik möglich.

Das Strahlungsfeld der Xenonlampe hinter der Lichtmischeroptik habe ich auf Intensität und räumliche Inhomogenität (nach der IEC-Norm) hin untersucht. Die Abbildung 26 zeigt das Ergebnis: Gemessen habe ich eine  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  große Fläche in 1 cm Schritten. Bis zu einem Abstand von ca. 60 cm trägt im wesentlichen die zentrale Linse der Lichtmischeroptik zur Intensität bei. Entfernt man sich weiter von der Optik, so treten die Beiträge der anderen Linsen hinzu; die Inhomogenität nimmt in diesem Bereich stark ab. Im Abstand von 150 cm überdecken sich die Teilstrahlen innerhalb der  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  Meßfläche vollkommen, die Inhomogenität ist dort auf unter 5% angelangt. Ab hier gilt folgendes Abstandsgesetz:

$$\text{Intensität} \propto r^{-1.78} \quad r > 150 \text{ cm}$$

Den Koeffizient 1.78 berechnet man durch Anpassung einer Funktion  $A \cdot x^B$  an die Meßwerte. Die Korrelation der angepassten Funktion mit den Meßwerten ist besser 0.999 (sehr gute Anpassung).

---

<sup>1</sup> Abschwächung des projizierten Strahlungsfeldes in den Randbereichen durch die Apertur des einfallenden Strahlungsfeldes. Auch: Unterbelichtung an Rändern und Ecken einer Photographie.

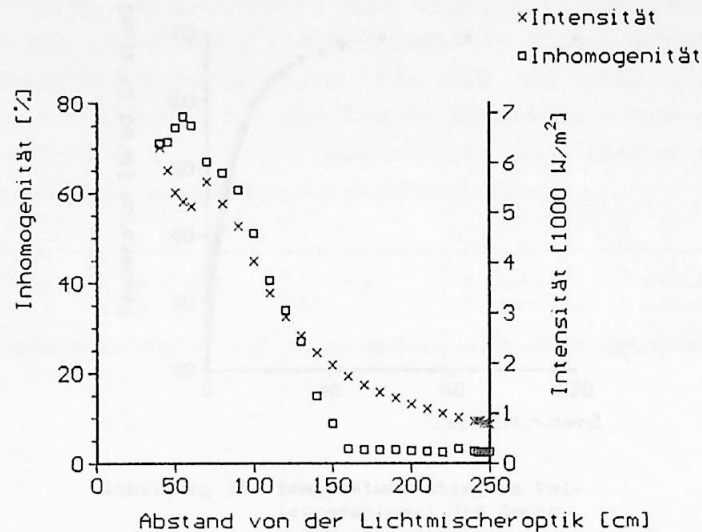


Abbildung 26: Räumliche Intensitätsverteilung und Abstandsgesetz des Xenonsolarsimulators.

Ein Xenonlampennetzgerät mit Zündgerät zum Betrieb einer 4000 W Xenon-Kurzbogenlampe wurde von mir zusammen mit Herrn Dipl.Ing.Siegfried Kunzelmann an den Lampenkäfig im alten Solarsimulator angeschlossen. Zur Zeit wird noch eine 2500 Watt Lampe verwendet. Das größte Problem bei einem Tausch der Lampe gegen eine 4000 Watt Lampe besteht in der Wärmeabfuhr am Kollektorspiegel. Die Beschichtung des parabolischen Kollektorspiegels darf 230° nicht übersteigen<sup>1</sup>. Da die Temperaturmessung direkt auf der Beschichtung des Spiegels im Betrieb der Lampe nicht möglich ist, habe ich die Temperatur an der Außenhaut gemessen. Abbildung 27 zeigt den Temperaturverlauf an der Außenhaut des Spiegels, gemessen bei Betrieb der 2500 Watt Lampe mit 70 Ampère. Die Endtemperatur von 70° Celsius sollte demnach bei Betrieb einer 4000 Watt Lampe nicht wesentlich überschritten werden.

<sup>1</sup> Nach Auskunft von Melles Griot (Optische Instrumente) für vergleichbare Oberflächenspiegel.

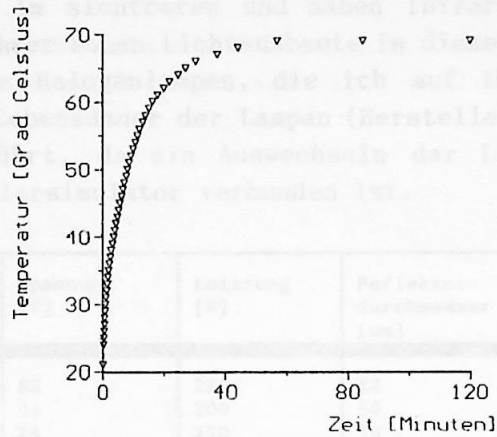


Abbildung 27: Temperaturanstieg am Kollektorspiegel des Xenonsolarsimulators.

Die spektrale Verteilung der Xenonlampe hinter der Lichtmischeroptik ist in Abbildung 28 zu sehen. Die Projektionslinsen der Lichtmischeroptik sind zum Teil mit Filtern versehen; Die spektrale Verteilung ist der Verteilung des Sonnenlichts außerhalb der Erdoberfläche ähnlich. Zum Vergleich ist das Sonnenspektrum außerhalb der Erdoberfläche ("AIR MASS 0") mit eingezeichnet.

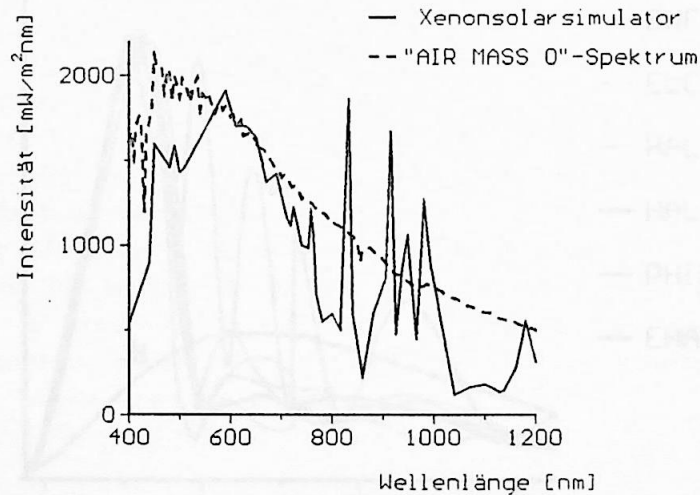


Abbildung 28: Spektrum des Xenonsolarsimulators und AM 0-Spektrum.



Für die Lichtquellen im sichtbaren und nahen Infrarotbereich eignen sich Halogenlampen wegen ihrer hohen Lichtausbeute in diesem Bereich. Die Tabelle 10 zeigt verschiedene Halogenlampen, die ich auf ihre Eigenschaften hin untersucht habe. Die Lebensdauer der Lampen (Herstellerangaben) habe ich als Kriterium mit aufgeführt, da ein Auswechseln der Lampen mit aufwendigen Justierarbeiten am Solarsimulator verbunden ist.

Bezeichner	Spannung [V]	Leistung [W]	Reflektor- durchmesser [mm]	mittlere Lebens- dauer [h]
EXY	82	250	42	200
EWf	24	200	50	50
ELC	24	250	50	50
Halo-Star	12	75	50	3000
Halo-Star	12	50	50	3000
Philips	17	150	50	
EHA	120	500		50

Tabelle 10: untersuchte Halogenlampen.

Die spektralen Verteilungen der Halogenlampen sind in Abbildung 29 dargestellt: Die Lampen EXY bis Halo-Star 75 Watt sind Kaltlichtreflektorlampen. Die EHA ist eine Tageslichtprojektorlampe mit Aluminiumreflektor.

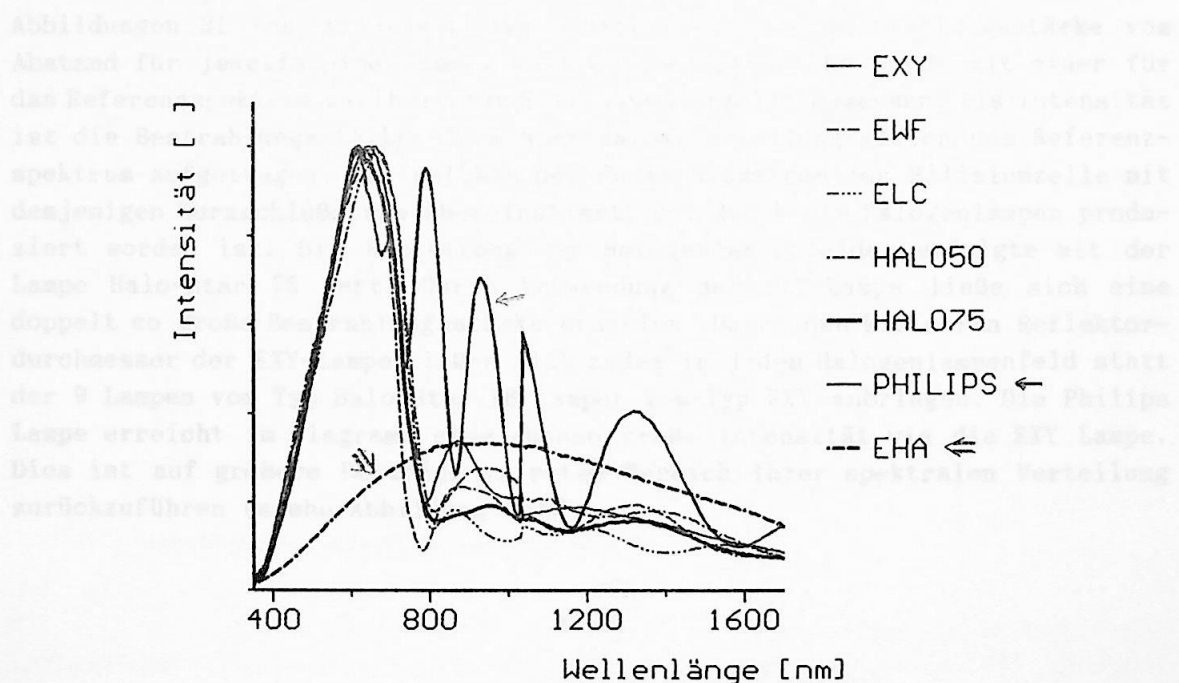


Abbildung 29: Spektrale Verteilung der untersuchten Halogenlampen.

Die Abbildung 30 zeigt die spektrale Verteilung einer Halogenlampe abhängig von der angelegten Spannung 3 bis 12 Volt in 1 Volt Schritten.

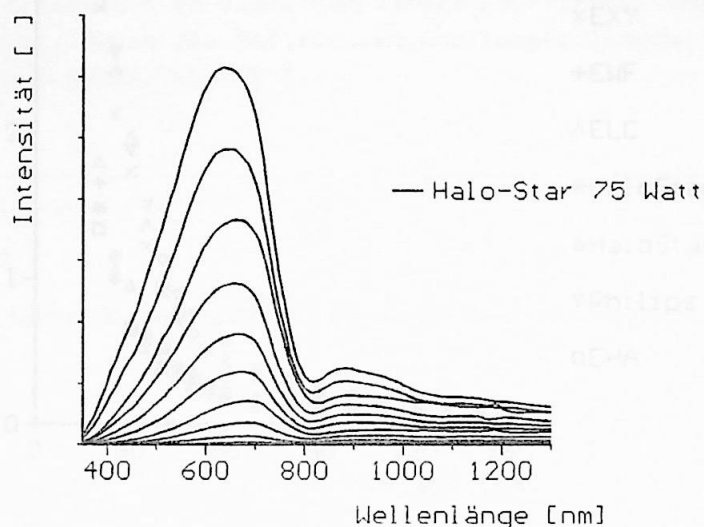


Abbildung 30: Abhängigkeit der spektralen Verteilung von der Leistung

Abbildungen 31 und 32 zeigen die Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke vom Abstand für jeweils eine Lampe. Die Bestrahlungsstärke wurde mit einer für das Referenzspektrum kalibrierten Siliziumsolarzelle gemessen. Als Intensität ist die Bestrahlungsstärke einer spektralen Verteilung gleich dem Referenzspektrum aufgetragen, bei welcher der Kurzschlußstrom der Siliziumzelle mit demjenigen Kurzschlußstrom übereinstimmt, der durch die Halogenlampen produziert worden ist. Die Bestückung der Halogenlampenfelder erfolgte mit der Lampe Halo-Star 75 Watt. Durch Verwendung der EXY-Lampe ließe sich eine doppelt so große Bestrahlungsstärke erzielen. Durch den kleineren Reflektordurchmesser der EXY-Lampe ließen sich zudem in jedem Halogenlampenfeld statt der 9 Lampen vom Typ Halo-Star 16 Lampen vom Typ EXY anbringen. Die Philips Lampe erreicht im Diagramm eine ebenso große Intensität wie die EXY Lampe. Dies ist auf größere Beiträge im roten Bereich ihrer spektralen Verteilung zurückzuführen (siehe Abbildung 29).

Für die Untersuchung des Abstandsgesetzes der Halogenlampen habe ich zu die Daten aus Abbildung 31 eine Ausgleichsfunktion angepasst. Die Tabelle 11 zeigt das Ergebnis der Ausgleichsrechnung. Die Anpassung der Ausgleichsfunktion an die Daten war in allen Fällen sehr gut (Korrelation besser 0,998). Die Lichtleistung wurde jeweils in einem Raumwinkel abgemessen (das entspricht  $\Omega = 2,17 \cdot 10^{-2} \text{ sr}$ ). Durch die Reflektoren der Lampen ist der Koeffizient in allen Fällen größer als  $-2$ .

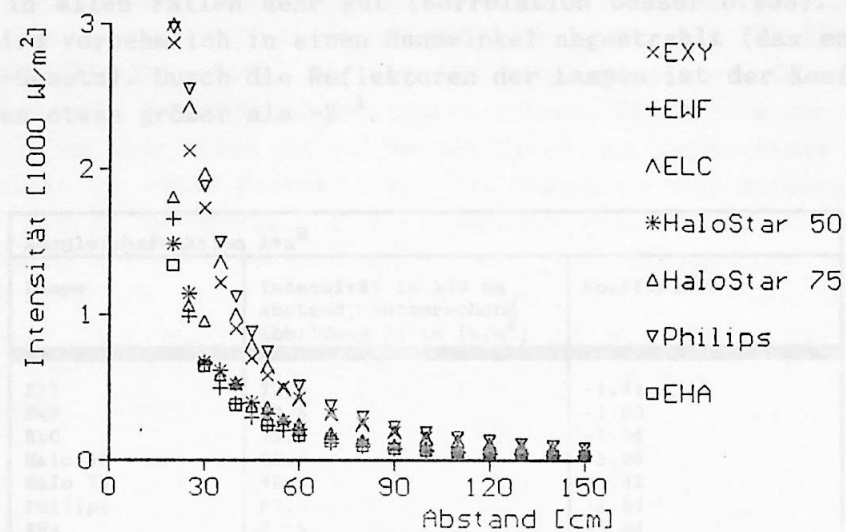


Abbildung 31: Abstandsgesetze der Halogenlampen.

Die Abbildung 32 zeigt den Ausschnitt der Abbildung 31 für den Bereich der Intensität von 0 bis 0,2. Der Wirkungsgrad der Lampe steigt mit zunehmender Leistung leicht an.

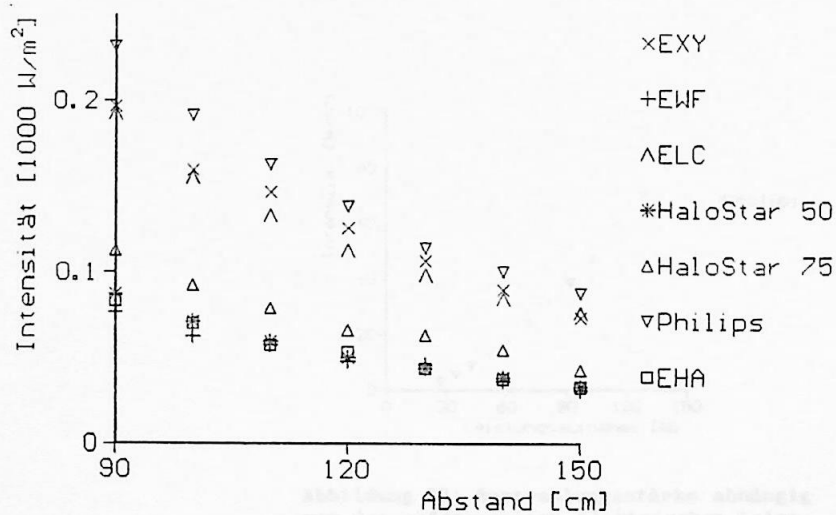


Abbildung 32: Ausschnitt aus Abbildung 31.

Für eine Kaltlichtreflektorlampe und für die Tagelichtprojektorlampe habe ich die Möglichkeit untersucht, die Intensität durch eine zusätzliche Optik für den Abstand Testebene-Halogenlampen von 150 cm zu verbessern. Der Ver-

größerungsfaktor der Optik ist  $M = 2$ .

Zur Untersuchung des Abstandsgesetzes der Halogenlampen habe ich an die Daten aus Abbildung 31 eine Ausgleichsfunktion angepasst. Die Tabelle 11 zeigt das Ergebnis der Ausgleichsrechnung. Die Anpassung der Ausgleichsfunktion an die Daten war in allen Fällen sehr gut (Korrelation besser 0.998). Die Lichtleistung wird vornehmlich in einen Raumwinkel abgestrahlt (das entspricht  $B = -2$ ,  $1/r^2$ -Gesetz). Durch die Reflektoren der Lampen ist der Koeffizient in allen Fällen etwas größer als  $-2$ <sup>1</sup>.

Ausgleichsfunktion $A \cdot x^B$		
Lampe	Intensität in 150 cm Abstand, entsprechend Abbildung 31 in $[W/m^2]$ .	Koeffizient B
EXY	72.8	-1.84
EWf	30.8	-1.93
ELC	75.4	-1.94
Halo 50	32.9	-1.96
Halo 75	42.5	-1.82
Philips	87.0	-1.85
EHA	32.5	-1.84

Tabelle 11: Abstandsgesetze der Halogenlampen

Die Abbildung 33 zeigt die Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke von der Leistungsaufnahme. Der Wirkungsgrad der Lampe steigt mit zunehmender Leistung leicht an.

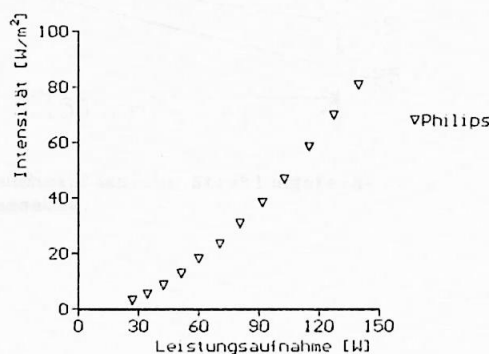


Abbildung 33: Bestrahlungsstärke abhängig von der aufgenommenen elektrischen Leistung einer Halogenlampe

Für eine Kaltlichtreflektorlampe und für die Tageslichtprojektorlampe habe ich die Möglichkeit untersucht, die Intensität durch eine zusätzliche Optik für den Abstand Testebene-Halogenlampen von 150 cm zu verbessern. Der Ver-

<sup>1</sup> Im Fall parallelen Lichtes wäre  $B = 0$ .



suchsaufbau ist in Abbildung 34 dargestellt. Es haben mir Linsen im Durchmesser 50 mm mit Brennweiten zwischen 50 mm und 500 mm zur Verfügung gestanden. Die besten Ergebnisse habe ich mit der 50 mm Linse erzielt. Abbildung 35 zeigt die Verteilung der EXY Lampe mit und ohne Linse. Die Verteilungen hatte ich durch die Anpassungsfunktion  $y=A*EXP(-B*x^2)$  für die EXY-Lampe und der Funktion  $y=A*EXP(-B*(x-C)^2)$ <sup>1</sup> für die EHA Lampe berechnet. Die Anpassungsfunktionen sind in den Abbildungen eingezeichnet. Die Breite der Verteilung<sup>2</sup> nimmt, von 27 cm ohne Linse auf 6.1 cm mit Linse, ab. Dafür nimmt das Maximum der Intensität um einen Faktor 3 zu. Die Meßpunkte der Messung mit Linse laufen bei ca. 15 cm zurück auf die Messkurve der Messung ohne Linse; Die Lampe strahlt in diesem Bereich an der nur 50 mm großen Linse vorbei<sup>3</sup>. Abbildung 36 zeigt die Verteilung der EHA Lampe ohne Linse (nahezu konstant) und mit Linse im Abstand 30 mm bzw. 40 mm von der Lampe. Die Breite der Verteilung nimmt von 18 cm auf 9.5 cm ab. Das Maximum der Intensität steigt um einen Faktor 2 bzw. 3.

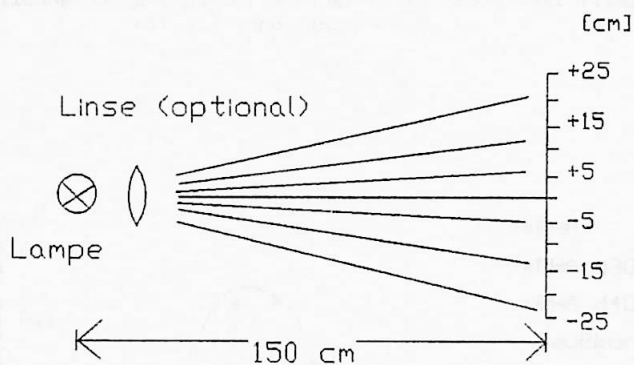


Abbildung 34: Versuchsaufbau zur Strahlungsfeldvermessung.

<sup>1</sup> Unter Berücksichtigung der Verschiebung der Verteilung gegen den Mittelpunkt (siehe Abbildung 36).

<sup>2</sup> Berechnet als Standardabweichung der Gaußfunktion.

<sup>3</sup> Dies ist auch der Grund, warum ich nur die EXY -Kaltlichtreflektorlampe (kleinster Reflektordurchmesser) untersucht habe.

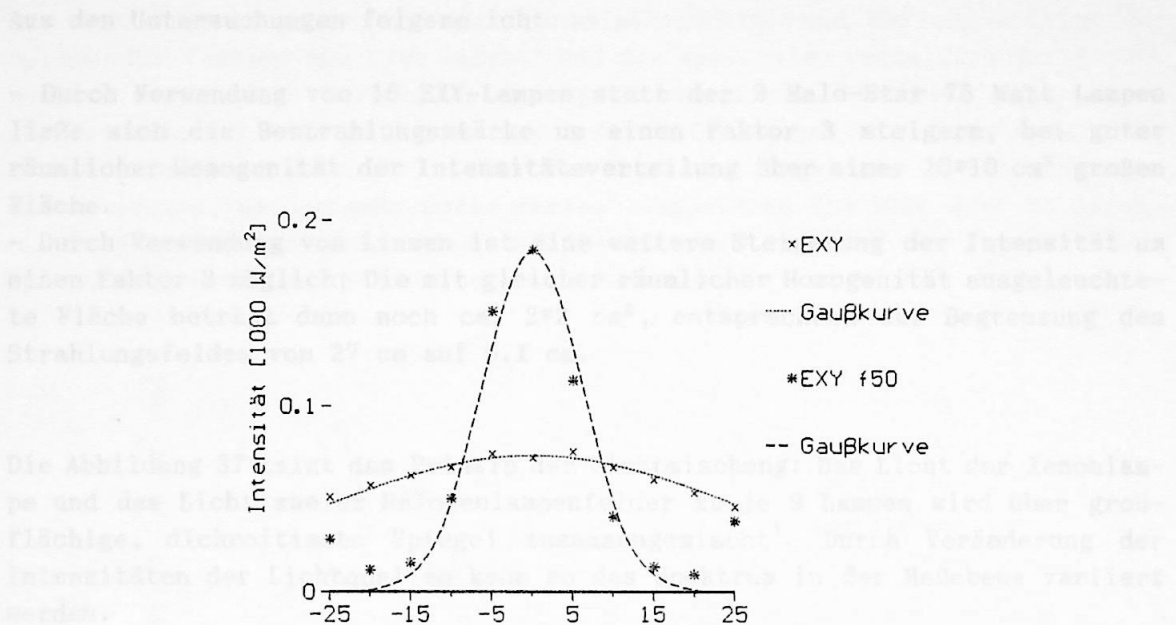


Abbildung 35: Strahlprofil einer Kaltlichtreflektorlampe mit und ohne Linse.

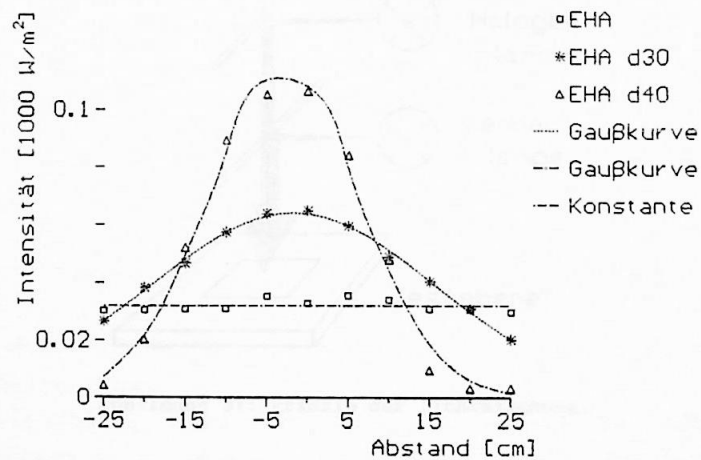


Abbildung 36: Strahlprofil der Tageslichtprojektorlampe ohne Linse und mit in verschiedenen Abständen von der Lampe angebrachter Linse.

Aus den Untersuchungen folgere ich:

- Durch Verwendung von 16 EXY-Lampen statt der 9 Halo-Star 75 Watt Lampen ließe sich die Bestrahlungsstärke um einen Faktor 3 steigern, bei guter räumlicher Homogenität der Intensitätsverteilung über einer  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  großen Fläche.
- Durch Verwendung von Linsen ist eine weitere Steigerung der Intensität um einen Faktor 3 möglich; Die mit gleicher räumlicher Homogenität ausgeleuchtete Fläche beträgt dann noch ca.  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ , entsprechend der Begrenzung des Strahlungsfeldes von 27 cm auf 6.1 cm.

Die Abbildung 37 zeigt das Prinzip der Lichtmischung: Das Licht der Xenonlampe und das Licht zweier Halogenlampenfelder zu je 9 Lampen wird über großflächige, dichroitische Spiegel zusammengemischt<sup>1</sup>. Durch Veränderung der Intensitäten der Lichtquellen kann so das Spektrum in der Meßebeine variiert werden.

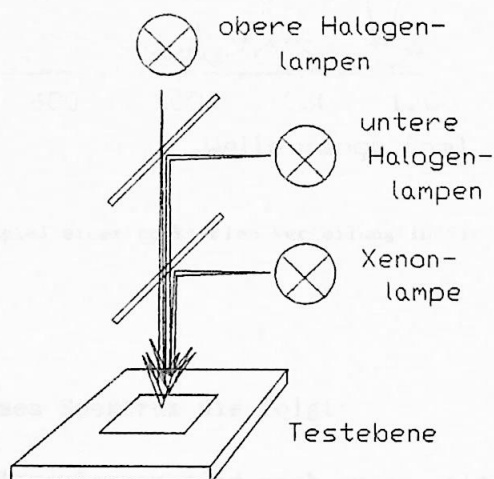


Abbildung 37: Prinzip der Lichtmischung.

<sup>1</sup> Siehe Anhang 2.

<sup>2</sup> Allen Berechnungen wurde die in Abbildung 36 dargestellte Verteilung der Xenonlampe und die Verteilung von 9 Halo-Star 75 Watt Lampen in  $1.50 \text{ m}$  Abstand sowie 9 Halo-Star Lampen in  $50 \text{ cm}$  Abstand (Zusatzeleuchtung) zugrunde gelegt.

<sup>1</sup> Farbteilerspigel, siehe Anhang B.

Die Abbildung 38 zeigt die aus Transmissionsdaten und Reflexionsdaten der Spiegel Rot (unten) und Cyan (oben)<sup>1</sup> und der spektralen Verteilung der Lichtquellen berechneten Verteilung des Spektrums in der Testebene<sup>2</sup>. Die Summe der Verteilungen ("Total") ist gegen das Referenzspektrum eingetragen. Die Zusatzbeleuchtung durch 50 cm über der Testebene angebrachten Halogenlampen war notwendig, um die geforderte Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W/m}^2$  zu erreichen<sup>3</sup>. Ein Katalog gemessener und berechneter Spektren für verschiedene Spiegelkombinationen befindet sich in Anhang B.

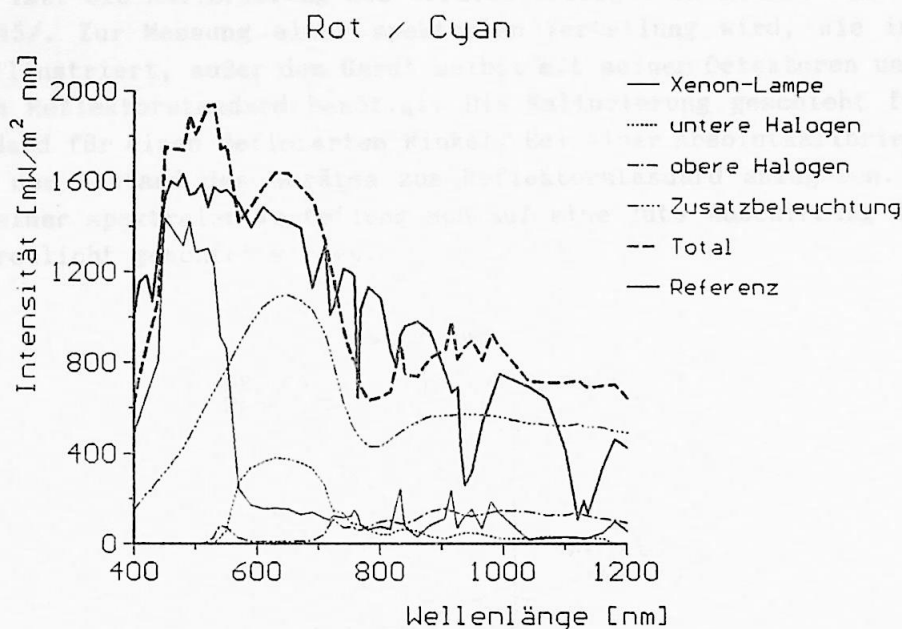


Abbildung 38: Beispiel einer spektralen Verteilung in der Testebene.

Ich interpretiere dieses Spektrum wie folgt:

- Die Beiträge der Halogenlampen sind noch um ca. einen Faktor 10 zu klein, um ohne Zusatzbeleuchtung auszukommen.
- Mit Zusatzbeleuchtung wird das Referenzspektrum gut nachgebildet. Die Halogenlampen eignen sich zur Justierung in den jeweiligen Spektralbereichen.
- Wegen der vergleichsweise geringen Beiträge der Halogenlampen müssen die Spiegel gut auf die zu messende Mehrfachsolarzelle abgestimmt sein.

<sup>1</sup> Siehe Anhang B.

<sup>2</sup> Allen Rechnungen wurde die in Abbildung 49 dargestellte Verteilung der Xenonlampe und die Verteilung von 9 Halo-Star 50 Watt Lampen in 1.50 m Abstand sowie 2 Halo-Star Lampen in 50 cm Abstand (Zusatzbeleuchtung) zugrunde gelegt.

<sup>3</sup> Das Erreichen dieser Bestrahlungsstärke ohne Zusatzbeleuchtung wird zu den schwierigsten Aufgaben für den weiteren Aufbau der Apparatur gehören, s. (IV.3.).



## 6. Messung der spektralen Verteilung in der Testebene des Solarsimulators

### 6.1. Spektralradiometer

Zur Messung der spektralen Verteilung wird ein Gitterspektrometer verwendet, das mithilfe zweier Detektoren (Si/PbS) im Bereich 350 nm bis 3000 nm empfindlich ist. Die Kalibrierung des Gerätes erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit /45/. Zur Messung einer spektralen Verteilung wird, wie in Abbildung 39 illustriert, außer dem Gerät selbst mit seinen Detektoren und seiner Optik ein Reflektorstandard benötigt. Die Kalibrierung geschieht für Gerät und Standard für einen definierten Winkel. Bei einer Absolutkalibrierung ist außerdem der Abstand des Gerätes zum Reflektorstandard anzugeben. Bei der Messung einer spektralen Verteilung muß auf eine gute Abschirmung der Optik gegen Streulicht geachtet werden.

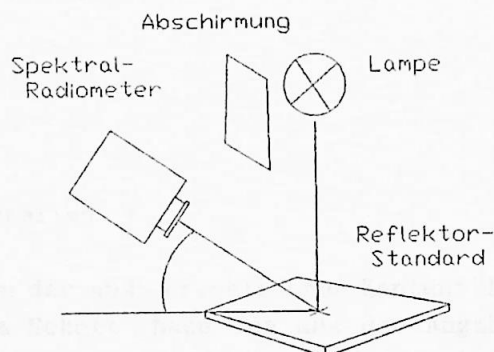


Abbildung 39: Messung eines Spektrums mit einem Spektralradiometer.

Die Abbildungen 40 und 41 zeigen einen Vergleich von mit dem Spektralradiometer in der Testebene gemessenen Verteilungen mit aus Transmissions- und Reflexionskurven der Spiegel sowie der Verteilungen der Lichtquellen berechneten Verteilungen. Die Abbildungen belegen die Zuverlässigkeit der Berechnungen<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> vergleiche auch Messungen und Rechnungen in Anhang B.

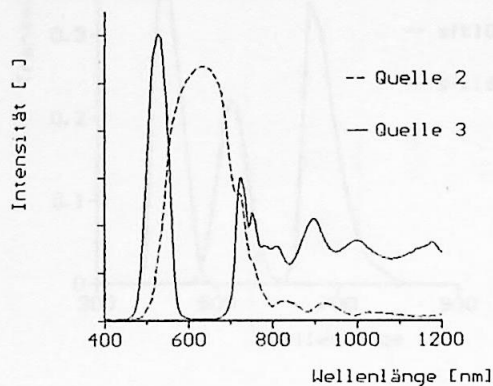


Abbildung 40: Ergebnis der Messung der Beiträge zweier Lichtquellen in der Testebene

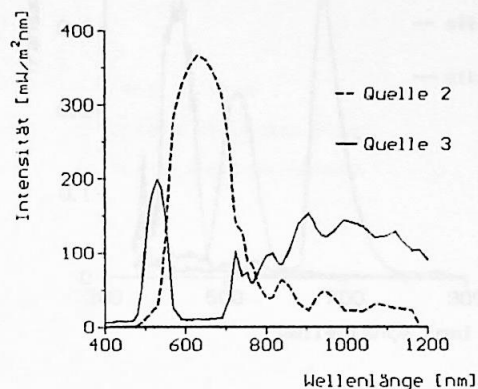


Abbildung 41: Ergebnis der Berechnung der Beiträge aus Abbildung 40.

## 6.2. Gefilterte Solarzellen

Die Transmissionsdaten der aus verschiedenen Kantenfiltern zusammengesetzten SFK-Filtern der Firma Schott<sup>1</sup> habe ich aus den Angaben der inneren Transmissionsgrade der Komponenten nach Herstellerangaben und der Annahme von Grenzflächenverlusten für einen Brechungsindexübergang 1:1.5:1 /46/ berechnet. Zur Überprüfung der Herstellerangaben sind die Transmissionskurven an einem Fourierspektrometer gemessen worden. Die Abbildungen 42 und 43 zeigen die gute Übereinstimmung der Rechnungen mit den Messungen. Im blauen Bereich sind die Messungen verrauscht, da dort die Empfindlichkeit des verwendeten Detektors stark abnimmt.

<sup>1</sup> "SFK" ist eine Typbezeichnung der Firma Schott für zusammengesetzte Absorptionsfilter.

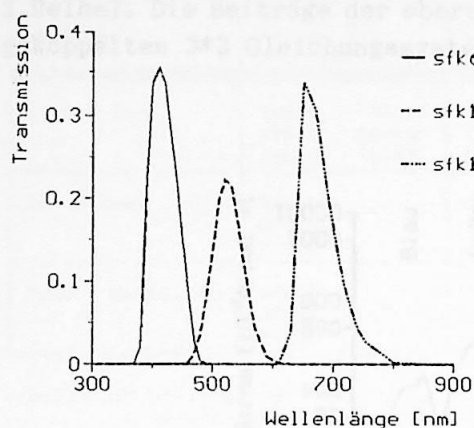


Abbildung 42: Berechnete Transmissionskurven der ROT GRÜN BLAU Filtergläser.

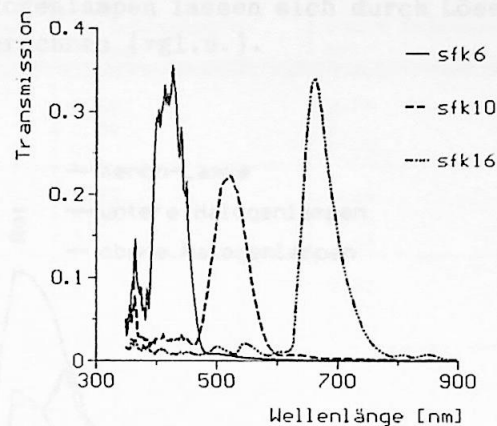


Abbildung 43: Gemessene Transmissionskurven der ROT GRÜN BLAU Filtergläser.

Abbildung 44 zeigt das Ergebnis der Filterung von monokristallinen Silizium-solarzellen mit den SFK-Filtern. Zum Vergleich ist die willkürlich auf 0.5 normierte spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges mit eingezeichnet (dünne Kurve). Sowohl die Referenzzellen als auch die Rot-Grün-Blau (RGB) Sensoren in der Testebene sollen mit diesen Filtern versehen werden.

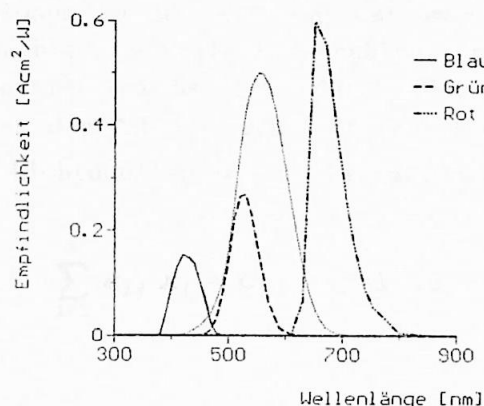


Abbildung 44: Empfindlichkeit gefilterter Solarzellen und Augensensitivität.

Die Abbildung 45 zeigt exemplarisch die Messung der spektralen Verteilung in der Testebene mithilfe gefilterter Solarzellen: Dargestellt sind, in logarithmischer Auftragung, die spektralen Kurzschlußströme der RGB-Sensoren für die Beiträge der verschiedenen Lampen, mit Rotspiegel (unten) und Cyanspiegel (oben) im Spiegelgehäuse eingebaut. Die Sensoren Blau und Grün selektieren die Xenonlampe, der Sensor Rot die unteren Halogenlampen (siehe Tabelle 12,

2.Reihe). Die Beiträge der oberen Halogenlampen lassen sich durch Lösen eines gekoppelten 3\*3 Gleichungssystems berechnen (vgl.u.).

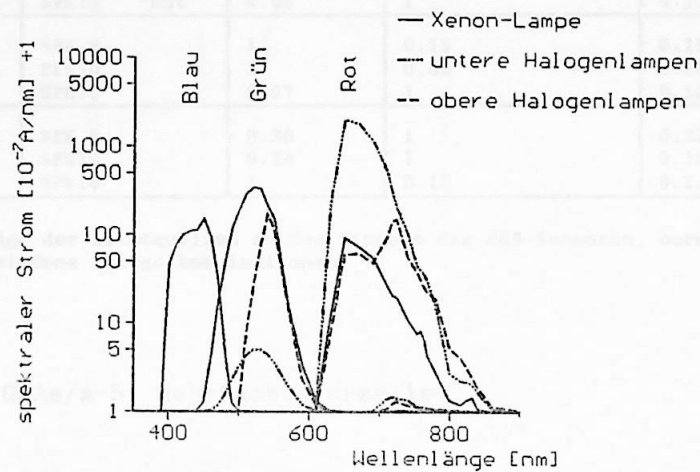


Abbildung 45: Beiträge zu den Strömen der RGB-Sensoren von den einzelnen Lichtquellen bei Spiegelkombination Rot/Cyan.

Die Tabelle 12 zeigt das Verhältnis der Beiträge der Lichtquellen verschiedener Spiegelkonfigurationen zu den Kurzschlußströmen der RGB-Sensoren. Die Ströme für eine gewünschte spektrale Einstrahlung, zusammengesetzt aus den Beiträgen der 3 Lichtquellen, erhält man durch Lösen eines 3\*3 Gleichungssystems mit den Strömen der Tabelle als Koeffizienten  $a_{ij}$  und den Intensitätskoeffizienten der Lichtquellen  $\mu_i$  als Parameter  $x_i$ :

$$\sum_{i=1}^3 a_{ij} x_i = c_j \quad j=1..3$$

(1)

Die  $c_j$  sind Normierungskonstanten und müssen durch Kalibrierung der RGB-Sensoren bestimmt werden.



Spiegel	Filter der Sensoren	Licht der Xenonlampe	untere Halogen-lampen	obere Halogen-lampen
Gelb / Cyan	SFK 6 "Blau"	1	0.25	0.36
	SFK10 "Grün"	0.24	0.38	1
	SFK16 "Rot"	0.05	1	0.13
Rot / Cyan	SFK 6	1	0.15	0.15
	SFK10	1	0.08	0.28
	SFK16	0.07	1	0.13
Cyan / Kaltlicht	SFK 6	0.30	1	0.32
	SFK10	0.28	1	0.16
	SFK16	1	0.13	0.23

Tabelle 12: Beiträge der Lichtquellen zu den Strömen der RGB-Sensoren, berechnet für verschiedene Spiegelkombinationen

## 7. Testobjekt: GaAs/m-Si Mehrfachsolarzelle

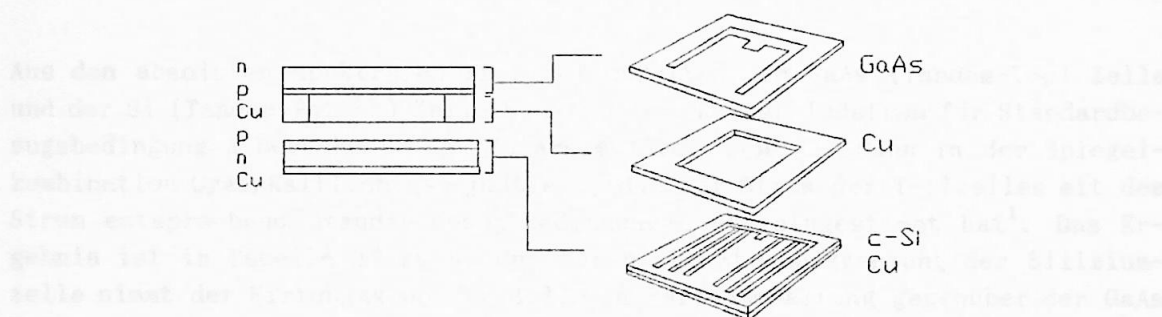


Abbildung 46: Blockbild der GaAs/Si Stapelsolarzelle zu Testzwecken. Die Teilzellen sind elektrisch einzeln zugänglich.

Um das Meßverfahren möglichst schon in der Aufbauphase der Apparatur zur frühzeitigen Erkennung auftretender Probleme ausprobieren zu können, hatte ich mich entschieden, eine Mehrfachsolarzelle mit elektrisch einzeln zugreifbaren Kontakten verwenden. Glücklicherweise konnte mir die Abteilung Solarzellentechnologie am Institut zum damaligen Zeitpunkt (Januar 1991) eine GaAs Zelle mit durchbrochenem Kupferrückkontakt herstellen. Die Zelle wurde in einem von mir speziell konstruiertem Halter<sup>1</sup> über eine monokristalline Siliziumzelle gesetzt. Die Abbildung 46 zeigt den Aufbau der Zelle schematisch. Abbildung 47 zeigt die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle. Unter dem Referenzspektrum begrenzt die Siliziumzelle den Strom in Serienschaltung.

<sup>1</sup> Siehe Anhang A, Photo rechts unten.

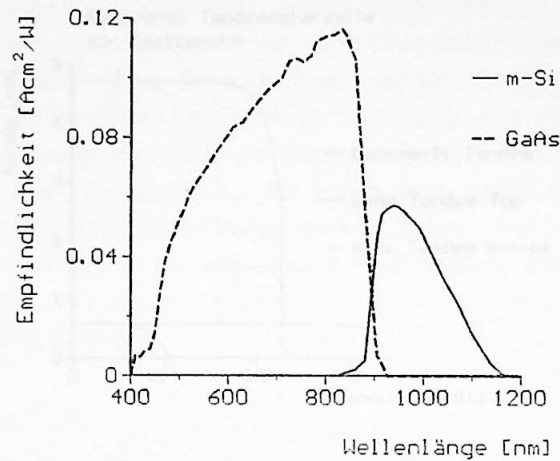


Abbildung 47: Spektrale Empfindlichkeit der GaAs/Si Mehrfachsolarzelle.

Aus den absoluten spektralen Empfindlichkeiten der GaAs (Tandem-Top) Zelle und der Si (Tandem-Bottom) Zelle habe ich den Kurzschlußstrom für Standardbezugsbedingungen berechnet. Den Solarsimulator habe ich dann in der Spiegelkombination Cyan/Kaltlicht so justiert, daß der Strom der Teilzellen mit dem Strom entsprechend Standardbezugsbedingungen übereingestimmt hat<sup>1</sup>. Das Ergebnis ist in Tabelle 13 zu sehen. Durch die Strombegrenzung der Siliziumzelle nimmt der Wirkungsgrad der Zelle in Serienschaltung gegenüber der GaAs Zelle sogar ab. Die Kennlinien der Einzelzellen und der Serienschaltung in Abbildung 48 veranschaulichen dies noch einmal deutlich. Die Leerlaufspannung der Mehrfachzelle ist die Summe der Leerlaufspannungen der Teilzellen. Diese Meßdaten wurden mit der Elektronik der Präzisionsmeßplatzes aufgenommen. In Abbildung 49 sind die spektralen Ströme der Teilzellen für Standardbezugsbedingungen und für die Meßbedingungen dargestellt.

	GaAs Tandem Top	Si Tandem Bottom	Tandem in Serie
$I_{sc}$ [mA]	4.71	0.52	0.52
$V_{oc}$ [V]	0.97	0.42	1.36
$FF$	0.77	0.58	0.82
$\eta$ [%]	14	0.52	2.7

Tabelle 13: Kennlinienparameter und Wirkungsgrad der Testzelle GaAs/Si einzeln und in Serie.

<sup>1</sup> Methode aus II.2.2.2.

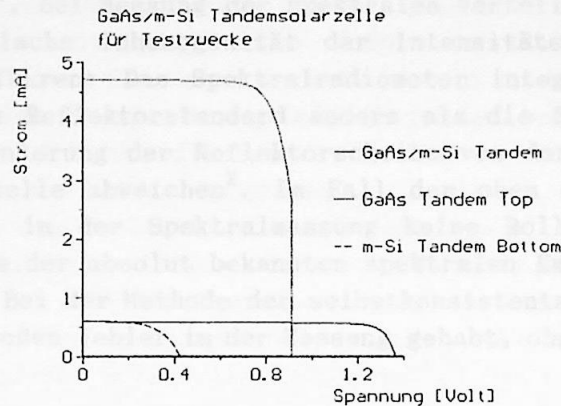


Abbildung 48: Kennlinie der GaAs/Si in Serienschaltung und Kennlinien der Teilzellen.

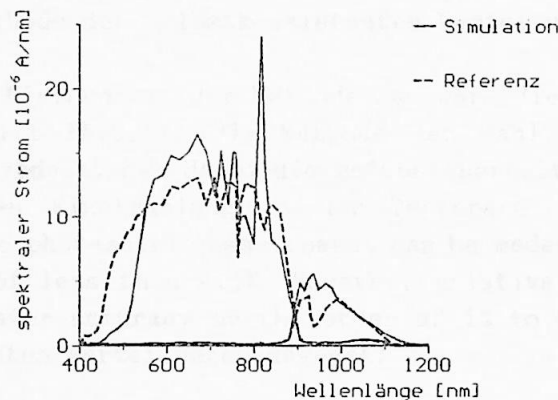


Abbildung 49: Ströme in der GaAs/Si Zelle unter dem Referenzspektrum und unter Simulation der Standardbezugsbedingungen.

Da ich dieser Messung den Simulator auf die Ströme der Teilzellen unter Bezugsbedingungen hin eingestellt habe, müßten die Flächen unter den spektralen Strömen bei der Solarsimulation in Abbildung 49 mit den berechneten Flächen unter Standardbezugsbedingungen übereinstimmen. Besonders für die Siliziumzelle ist offensichtlich, daß dies nicht der Fall ist. Das weist auf ein wichtiges Problem bei der Spektralmessung hin: Die Messung der spektralen Verteilung kann mit großen Meßfehlern behaftet sein. In diesem Fall ist die Abschirmung des Spektralradiometers gegen Streulicht unzureichend gewesen. Ein Teil des von der Rückseite der Zusatzbeleuchtung<sup>1</sup> kommenden Lichtes ist

<sup>1</sup> Sechs Halo-Star 75 Watt Lampen unter dem unteren Spiegel.

mitgemessen worden<sup>1</sup>. Bei Messung der spektralen Verteilung in der Testebene wird eine chromatische Inhomogenität der Intensitätsverteilung zu einem ähnlichen Effekt führen: Das Spektralradiometer integriert die spektrale Verteilung auf dem Reflektorstandard anders als die Solarzelle, wenn die Fläche und Positionierung der Reflektorscheibe von der Größe und Positionierung der Solarzelle abweichen<sup>2</sup>. Im Fall der oben diskutierten Messung spielt der Fehler in der Spektralmessung keine Rolle, da nach Methode II.2.2.2., mithilfe der absolut bekannten spektralen Empfindlichkeiten, justiert worden ist. Bei der Methode der selbstkonsistenten Verteilungen hätte man jedoch einen großen Fehler in der Messung gehabt, ohne daß dieser erkannt worden wäre.

#### IV. Diskussion

##### 1. Vorteile der Methode der selbstkonsistenten Verteilungen

Ginge man nach der Einfachheit der Methode, so wäre die "Methode der besten Anpassung" (Abschnitt II.2.1.) die Methode der Wahl. Der große Nachteil dieser Methode ist jedoch, daß dabei die Meßunsicherheit von der Absolutmessung der spektralen Einstrahlung in der Testebene abhängt. Myers /47/ schreibt: "[...] no photometric measurement can be made with certainty to an absolute accuracy of less than 4.1%. However, relative measurements can be made with much greater accuracy on the order of 1% to 2%". Bei der Methode der selbstkonsistenten Verteilungen dagegen:

- Meßunsicherheiten in der Absolutmessung von spektralen Verteilungen gehen nicht in die Meßunsicherheit der Methode ein. Im Gegensatz zur herkömmlichen rein experimentellen Verwendung der Methode der spektralen Fehlanpassung für jede Teilzelle erlaubt die um den numerischen Teil erweiterte Methode Abschätzungen über die Güte der Konvergenz:
- Eine Möglichkeit der quantitativen Abschätzung der Konvergenzgüte ist es, die Auswirkung von "Störungen" in den Eingangsdaten der Methode (siehe Abbildung 8, Seite 18) auf die Solarzellenparameter zu untersuchen<sup>3</sup>. Aus einer Abschätzung der Meßunsicherheit in den Eingangsdaten ließen sich dann direkt die Unsicherheiten in den Solarzellenparametern angeben. Für eine solche Untersuchung könnte man sich auf den numerischen Teil des Verfahrens beschränken, wenn man den durch den experimentellen Teil korrigierten Fehler als konstant ansieht. Zwar ist prinzipiell auch mit einer rein experimentel-

<sup>1</sup> Inzwischen ist die Ursache für diesen Effekt behoben.

<sup>2</sup> Dies ist ein wichtiger Grund, auf eine möglichst homogene räumliche Intensitätsverteilung der Beiträge der Lichtquellen hinzuarbeiten, s. (IV.3.).

<sup>3</sup> D.i. eine "Empfindlichkeitsanalyse" durchführen.



len Anwendung des Verfahrens eine solche Abschätzung möglich, der hohe Zeitaufwand erschwert allerdings solche Untersuchungen<sup>1</sup>.

- Der wesentliche Vorteil der neuen Methode besteht in der größeren Geschwindigkeit, mit der die Standardbezugsbedingungen erreicht werden. Für einen Routinemeßplatz ist nicht nur die Präzision, sondern auch die Anzahl Messungen pro Zeiteinheit von großer Bedeutung.

- Die Möglichkeit, das Spektrum zu variieren, ermöglicht bei hoher Meßgeschwindigkeit und Präzision die experimentelle Untersuchung von realistischen Bezugsbedingungen auf die Kennlinienparameter im Labor durch Messung der Abhängigkeit der Kennlinienparameter von spektraler Verteilung und Intensität in der Testebene und der Solarzellentemperatur<sup>2</sup>.

## 2. Spezielle Probleme der Meßtechnik an Mehrfachsolarzellen

In /17//32/ werden Meßunsicherheiten wie sie bei der Messung herkömmlicher Solarzellen typischerweise auftreten ausführlich diskutiert. Bei der Messung von Mehrfachsolarzellen hat man im besonderen mit den folgenden zusätzlichen Unsicherheitsquellen zu rechnen:

Integral auftretende Meßunsicherheiten:

- Die Temperaturen der Teilzellen werden im allgemeinen voneinander abweichen.

- Strahldivergenz kann zu verschiedenen beleuchteten Flächen der Teilzellen führen, besonders für mechanisch zusammengesetzte ("stacked") Solarzellen.

- Fällt Licht in großen Winkeln ein, so kann wellenlängenabhängige Reflexion an der obersten Teilzelle stattfinden und die spektrale Verteilung, die auf darunterliegende Teilzellen einfällt, verändern.

- Alterungseffekte bei Referenzzellen werden verstärkt auftreten, wenn diese Zellen zur Anpassung an Teilzellen mit Filtern versehen werden, da diese Filter besonders durch Einwirkung ultraviolett Lichtes ihre Eigenschaften verändern<sup>3</sup>.

- Im Fall einzeln elektrisch zugreifbarer Zellen kann der Arbeitspunkt der nicht gemessenen Teilzellen die Kennlinienparameter der gemessenen Teilzelle beeinflussen /12/.

Spektral auftretende Meßunsicherheiten:

- Die spektral auftretenden Unsicherheiten bei Mehrquellensimulatoren sind

---

<sup>1</sup> Die experimentelle Justierung des Solarsimulators kann mehrere Stunden dauern, siehe auch K.Heidler, Reisebericht USA, (1990).

<sup>2</sup> Sogenannte "Realistic Reporting Conditions (RRC)" gehen statt von den in der IEC-Norm festgelegten Standardbezugsbedingungen von tatsächlich gemessenen oder aus Klimadaten berechneten Meßbedingungen aus, siehe hierzu A.Raicu et.al.9th European PVSEC, Freiburg, (1989).

<sup>3</sup> Nach Herrn Wittchen, PTB Braunschweig, führt UV-Bestrahlung zur Bildung von Farbzentren und damit zu erhöhter Absorption der Filter.

komplizierter als im Falle nur einer Lichtquelle, da die Beiträge der Lichtquellen im allgemeinen nicht mehr linear<sup>1</sup> in die Ströme der Teilzellen eingehen.

- Spektral auftretende räumlichen Intensitätsvariationen führen dazu, daß ein Spektralradiometer in der Testebene eine andere spektrale Verteilung mißt, als auf ein Testelement in der Testebene einfällt.

- Die spektralen Empfindlichkeiten der Teilzellen sind, besonders im Fall von Mehrfachsolarzellen, mit nur zwei elektrischen Anschlüssen, schwieriger zu messen /15//16/.

Manchmal wird die Abweichung des spektralen Fehlanpassungsfaktors  $M$  von 1 als Kriterium für die Meßunsicherheit angegeben. Man sollte sich jedoch im klaren darüber sein, daß auch für  $M = 1$  eine erhebliche Abweichung im spektralen Strom zwischen Meßbedingungen und Standardbezugsbedingungen vorliegen kann (vergleiche Abbildung 7, Abschnitt 1.2.2.). Daher sollte man bei der Verwendung eines variierbaren Spektrums bei Präzisionsmessungen stets den spektralen Strom der Solarzelle unter Meß- und Bezugsbedingungen vergleichen.

### 3. Überlegungen zu Meßunsicherheiten

Aus den Messungen an der Testzelle GaAs/Si (Abbildung 48,49, Seite 57) hatte ich den Eindruck gewonnen, daß die Messung der spektralen Verteilung des Lichts in der Testebene mit ausreichender Genauigkeit das größte Problem der Meßtechnik darstellen werde. Eine Überlegung zur Anforderung an die Genauigkeit der Spektralmessung möchte ich hier kurz skizzieren:

Die Fluktuationslänge  $f$  sei der mittlere Abstand genannt, mit der sich die Parameter  $\mu_i$  für jeden Iterationsschritt nach Erreichen einer Umgebung der Standardbezugsbedingungen (SRC) fortbewegen. Da jede erneute Spektralmessung mit zufälligen Meßfehlern behaftet ist, wird diese Länge größer Null sein. Sie ist positiv korreliert mit der statistischen Meßunsicherheit der Messung des Simulatorspektrums. Im Abbruchkriterium für die Iteration, der Bedingung für Selbstkonsistenz

$$|M_i^{(k)} - M_i^{(k-1)}| < \varepsilon \quad (1)$$

muß  $\varepsilon > f$  gewählt werden. Die Güte der Konvergenz kann deshalb nie besser sein als  $\delta = f$  (siehe Abbildung 50). Wird die Fluktuationslänge zu groß,

<sup>1</sup> Sondern eben multilinear, woraus sich bei Verallgemeinerung der Methode der spektralen Fehlanpassung die Notwendigkeit zur Lösung nichtlinearer Gleichungen ergibt.

oder wird die Konvergenzgeschwindigkeit zu gering<sup>1</sup>, so wird Konvergenz außerhalb von SRC vorgetäuscht (Abbildung 50, Folge der Sterne). Durch systematische Meßunsicherheiten in der Messung der spektralen Verteilung in der Testebene läuft das Verfahren von vorneherein gegen einen Punkt im Raum der Simulatoreinstellungen, der um ein Stück vom "wahren" SRC-Punkt verschoben ist. Die Größe der Verschiebung ist positiv korreliert mit der systematischen Meßunsicherheit der Messung des Simulatorspektrums. Sie kann unter Kenntnis der statistischen Meßunsicherheiten abgeschätzt werden, indem man Mehrfachsolarzellen unterschiedlicher Strombegrenzung mit Zugriff zu den Teilzellen in Serienschaltung in Standardbezugsbedingung bringt und die Teilströme anschließend einzeln mißt. Man erhält jeweils für den spektralen Bereich der strombegrenzenden Teilzelle der Mehrfachzelle eine Aussage über den systematischen Meßfehler. Eine andere, einfache Methode, die Meßunsicherheit abzuschätzen besteht darin, das Spektrum eines verfügbaren Xenonsolarsimulators als Referenzspektrum zu wählen und die Ergebnisse der Messung verschiedener Mehrfachsolarzellen unter diesem Referenzspektrum mit den so am Mehrfachsolarzellenmeßplatz erzielten Ergebnissen zu vergleichen /27/.

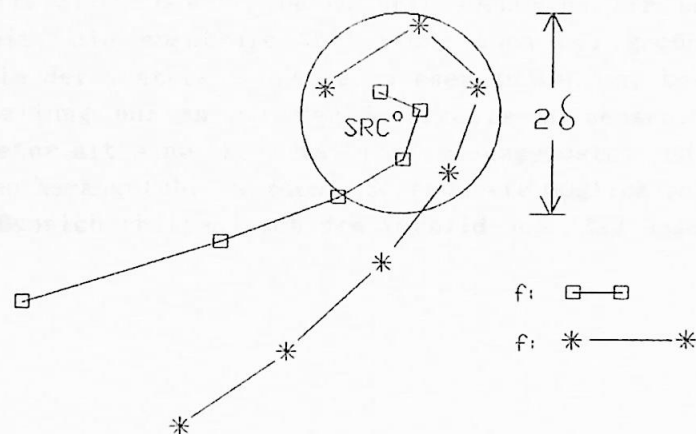


Abbildung 50: Poincaré-Schnitt durch den Raum der Intensitätskoeffizienten; Konvergenz mit verschiedenen Fluktuationslängen.

<sup>1</sup> Etwa durch einen Attraktor außerhalb von SRC, siehe I. Percival, D. Richards, Introduction to Dynamics, Cambridge University Press, (1987). Eine numerische Untersuchung, ob bei dem Verfahren Attraktoren auftreten können und wie sie sich auswirken mußte ich leider zurückstellen. Die Existenz solcher "Fallen" für den Lösungsalgorithmus der selbstkonsistenten Verteilungen kann nicht a priori ausgeschlossen werden.

#### 4. Weitere Schritte zum Aufbau der Apparatur

Um weitere Messungen zur Suche und Beseitigung von Meßunsicherheiten des Verfahrens der selbstkonsistenten Verteilungen sinnvoll durchführen zu können, muß das Meßprogramm und die Meßelektronik zunächst auf den Stand gebracht werden, der durch Abbildung 8 (Seite 18) spezifiziert ist. Der erste Schritt hierzu ist die Integration der Steuerung und Datenverarbeitung des Spektralradiometers in den Meßplatzrechner. Das nächste Problem, das gelöst werden muß, ist die präzise Messung der spektralen Verteilung in der Testebene. Könnte man die Inhomogenität der räumlichen Intensitätsverteilung jeder Lichtquelle unter 5% bringen, so wären Verfälschungen der Messung durch unterschiedliche räumliche Integration des Spektrums von Spektralradiometer und Solarzelle vermutlich bereits in einem vertretbaren Rahmen. Besonders schwierig wird das für die Lampen der Zusatzbeleuchtung sein, die sich in nur 50 cm Abstand von der Testebene befinden. Hier sollte man zunächst einmal die Inhomogenität in Abhängigkeit der Justierung der einzelnen Lampen untersuchen<sup>1</sup>. Das Verfahren der selbstkonsistenten Verteilungen sollte zunächst mit der bestehenden Optik (Lampen, Spiegel) angewandt werden. Daß die Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W/m}^2$  ohne Zusatzbeleuchtung, alleine mit den Halogenlampenfeldern, auf großen Flächen erreicht werden kann<sup>2</sup>, halte ich nach den in (III.5.2.) beschriebenen Untersuchungen für unwahrscheinlich. Eine Möglichkeit, die spektrale Verteilung auch bei großer chromatischer Inhomogenität in der Testebene präzise messen zu können, besteht darin, die spektrale Verteilung nur am Ort der Solarzelle zu messen. Dazu müßte das Spektralradiometer mit einer Kollimatoroptik ausgerüstet und sehr viel näher an die Testebene herangeführt werden<sup>3</sup>. So früh wie möglich sollte eine Untersuchung der Meßunsicherheiten nach dem Vorbild von /32/ angestrebt werden.

---

<sup>1</sup> Die von mir konstruierten Halogenlampenhalter sowie die Halter für die Zusatzbeleuchtung bieten durch kardanische Einzelaufhängung der Lampen gute Justiermöglichkeiten, die noch nicht untersucht wurden.

<sup>2</sup> Etwa zur Messung von Mini-Modulen bis  $30 \times 30 \text{ cm}^2$ .

<sup>3</sup> Für Meßflächen der Größe  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  (Abdeckung des Reflektorstandards) habe ich ein starkes Rauschen auf dem gemessenen Spektrum beobachtet. Das Meßsignal einer  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  beleuchteten Fläche ist für das Spektrometer im Abstand 70 cm zur Testebene zu schwach. Statt das Gerät näher an die Testebene heranzuführen ließe sich vielleicht auch eine entsprechende Optik konstruieren.



## V. Zusammenfassung

Als Aufgabenstellung war gegeben, eine Methode für die Präzisionsmessung von Mehrfachsolarmodulen zu entwickeln und eine entsprechende Apparatur soweit aufzubauen, daß vorläufige Messungen möglich sind. Dieses Ziel wurde voll erreicht. Ausgehend von einer optischen Bank und einem 20 Jahre alten Solarsimulator mit defekter Elektrik habe ich einen Meßplatz mit mehreren Lichtquellen zur Messung von Mehrfachsolarmodulen aufgebaut. Ich habe erste Messungen an einer Testzelle GaAs/Si unter Standardbezugsbedingungen durchgeführt. Noch können am Meßplatz keine Routinemessungen durchgeführt werden, da Spektralmessungen zur Zeit noch zu lange dauern, das Meßprogramm noch nicht alle Spezifikationen erfüllt und noch keine Meßunsicherheitsanalyse durchgeführt wurde. Es ist aber absehbar, daß der Meßplatz innerhalb der nächsten 6 Monate seine Aufgabe erfüllen wird.

Nach kurzer Einführung der Grundbegriffe (Kapitel I) habe ich in Kapitel II einen Überblick der bekannten Techniken zur Messung von Mehrfachsolarmodulen unter Standardbezugsbedingungen gegeben. Für die Meßtechnik habe ich ein Verfahren vorgeschlagen, welches kalibrierte Referenzelemente für jede der Teilzellen einer Mehrfachsolarmodule benutzt. In Kapitel III habe ich diese Technik näher diskutiert und habe im folgenden den Aufbau der Apparatur beschrieben, bei der diese Technik angewendet werden soll. Ich habe ferner die Messung einer räumlichen Intensitätsverteilung, entsprechend einer IEC-Norm, untersucht und einen, auf Experimente gestützten, Verbesserungsvorschlag gemacht. Des weiteren habe ich einen experimentellen Versuchsplan angegeben, nach dem der Punkt maximaler Leistung und somit der Wirkungsgrad konsistent und erwartungstreu bestimmt werden kann. In der anschließenden Diskussion (Kapitel IV) habe ich die Vorteile dieser Meßtechnik und spezielle Probleme der Meßtechnik an Mehrfachsolarmodulen genannt. Ich habe ein Modell zum Verständnis der Auswirkung von Meßunsicherheiten skizziert und habe am Ende die Schritte beschrieben, die für den Aufbau der Apparatur als Präzisions- und Routinemeßplatz noch notwendig sind.

## Ergänzende Materialien

### A Photos zur Apparatur

links Oben: Blick ins Spiegelhaus von der Solarzelle aus gesehen: Die gelben und die grünen Lampen sind Halogenlampen. Der blaue "Kugelhaufen" ist das Bild der Lichtmischeroptik der Xenonlampe. Eingebaut sind die Spiegel Gelb (unten) und Cyan (oben).

rechts Oben: Blick vom unteren Halogenlampenschacht der Apparatur auf die Meßebene. Rechts sind die oberen Halogenlampen zu sehen (Das Bild ist um  $90^\circ$  gekippt). Nahe der Testebene ist die Sensoreinheit mit vier gefilterten Solarzellen zu erkennen. Auf dem vergoldeten Meßblock liegt um  $45^\circ$  gedreht die Halterung der Testzelle GaAs/Si. Der helle Fleck in der Mitte ist die Reflexion des Simulatorlichtes an der GaAs Zelle.

links Mitte: Blick von schräg unten in den Solarsimulator. Der Gelbspiegel ist hell beleuchtet gut zu sehen. Die schwarze, kreisförmige Öffnung etwas unterhalb des Spiegels ist das "Auge" des Spektralradiometers. Auf dem Bildschirm ist (blau eingerahmt) eine Kennlinie dargestellt.

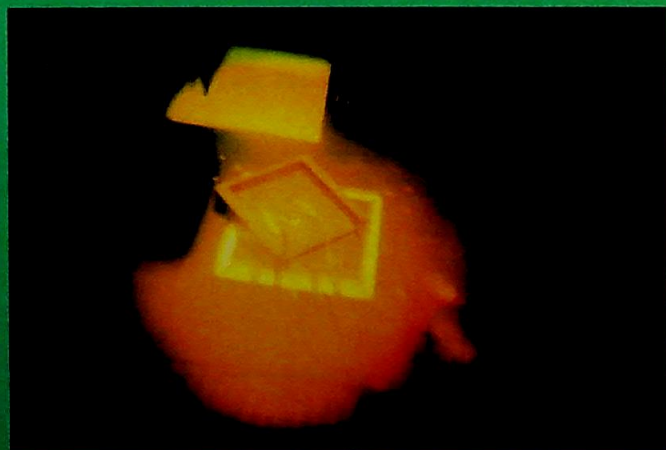
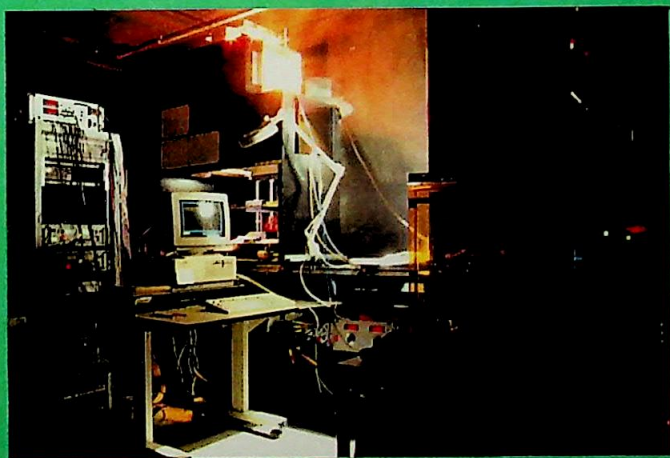
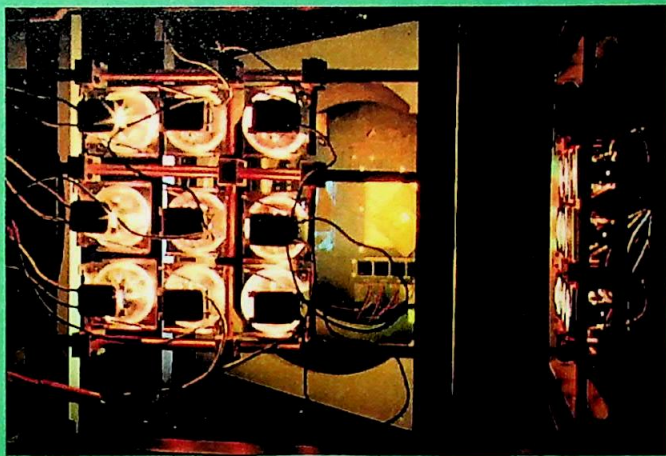
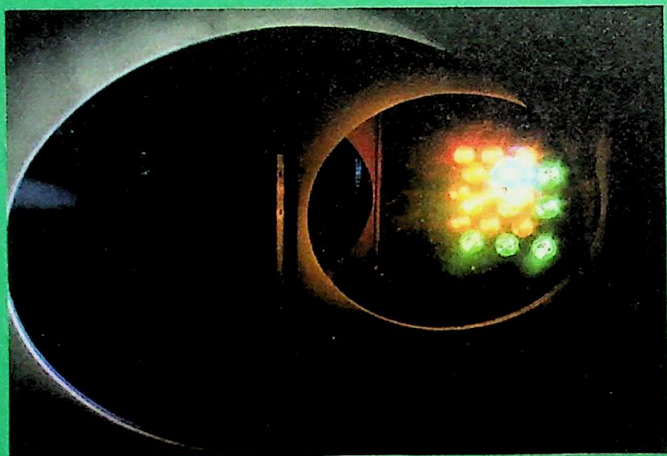
rechts Mitte: Blick auf die Apparatur. Der "Nebel" zwischen Xenonlampenhaus und dem Spiegelhaus ist Folge der Belichtungsverhältnisse. Links oben auf dem Elektronikschrank steht die Umschalteinheit. Die roten Anzeigen an der Vorderseite gehören zu Temperaturmessgeräten. Die beiden kleinen roten Lämpchen an der Seite zeigen zusammen mit 46 Anderen den Betriebszustand des Gerätes an. In dem gelben Kasten im Vordergrund sind schemenhaft die Umrisse einer 4000 Watt Xenonlampe zu erkennen.

links Unten: Blick durch die geöffnete Zieloptik des Spektralradiometers bei gelb beleuchteter Testebene. Der Meßblock mit darauf liegender Testzelle befindet sich in der Mitte des Zielrasters. Das weiße Viereck im Hintergrund ist der Reflektorstandard. Er wird zur Messung des Spektrums in die Mitte der Testebene gelegt.

rechts Unten: Meßtisch mit der Mehrfachsolarzelle GaAs/Si. Im Vordergrund rechts vor dem Reflektorstandard liegt ein Referenzelement der physikalisch-technischen Bundesanstalt. Rechts davon befinden sich U-I Anschlüsse. Im Vordergrund links liegen mehrere Kalibrierwiderstände für ein Experiment. In der Sensoreinheit über der Testebene (oben) sind die rot, grün und blau gefilterten Solarzellen gut zu identifizieren. Die Zelle ganz rechts ist mit einem Kantenfilter (715 nm) ausgestattet, das nur den Infrarotanteil des Lichts durchlässt.

Photos: Andrea Defner







## B Spiegel- und Spektrenkatalog

Sowohl Transmissions- als auch Reflexionskurven wurden unter  $45^\circ$  am Fourier-spektrometer gemessen. Bei Stellung des Spiegels  $45^\circ$  zur optischen Achse verschiebt sich die Transmissionskante um ca. 50 nm ins Blaue gegenüber senkrechtem Einfall<sup>1</sup>. Die hier dargestellten Kurven wurden für die Berechnung der Spektren verwendet.

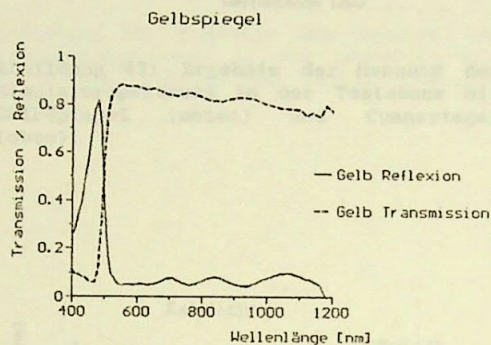


Abbildung 43: Ergebnis der Messung des Gelbspiegels am Fourier-spektrometer.

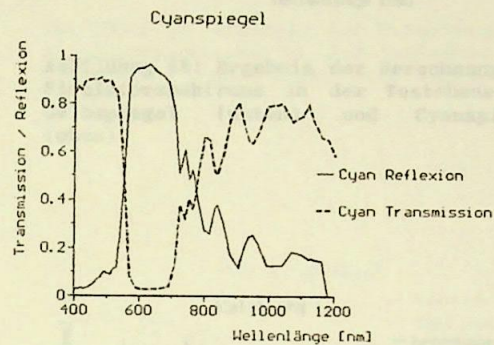


Abbildung 44: Ergebnis der Messung des Cyanspiegels am Fourier-spektrometer.

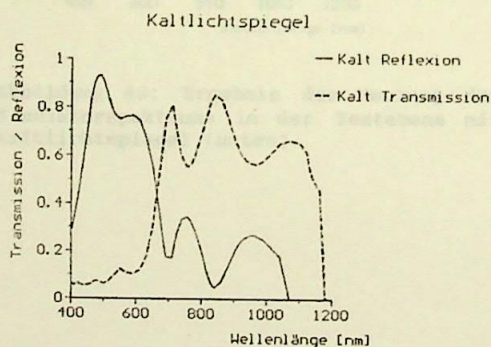


Abbildung 45: Ergebnis der Messung des Kaltlichtspiegels am Fourierspektrometer.

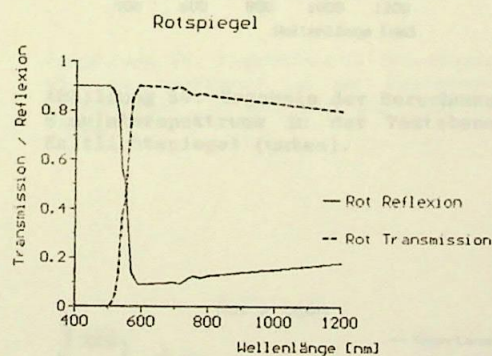


Abbildung 46: Transmissions- und Reflexionskurven des Rotspiegels unter  $45^\circ$  nach Herstellerangaben (Fa.OCLI, England).

<sup>1</sup> Nach Herstellerangaben und eigener Beobachtung am Fourierspektrometer.



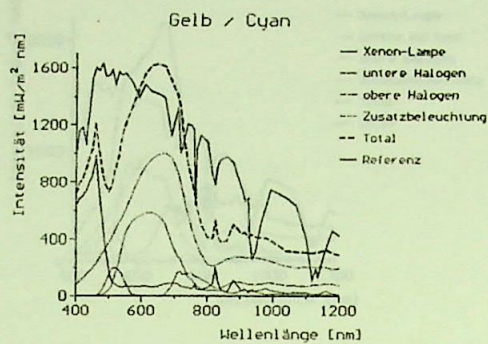


Abbildung 47: Ergebnis der Messung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Gelbspiegel (unten) und Cyanspiegel (oben).

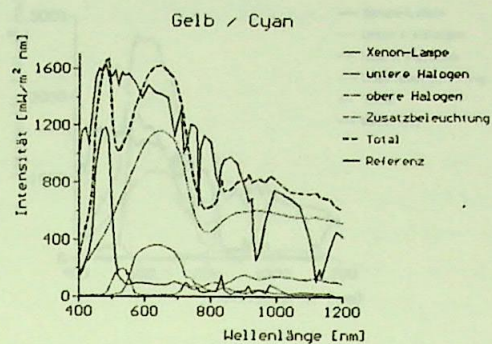


Abbildung 48: Ergebnis der Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Gelbspiegel (unten) und Cyanspiegel (oben).

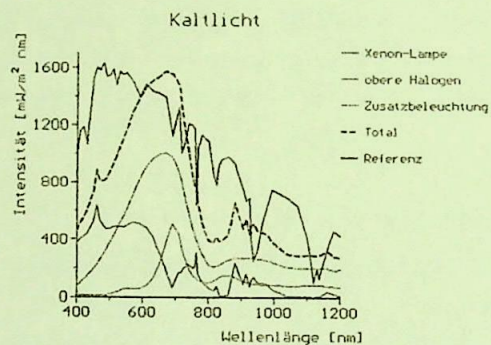


Abbildung 49: Ergebnis der Messung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Kaltlichtspiegel (unten).

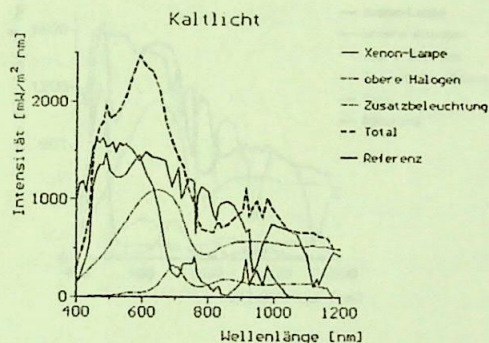


Abbildung 50: Ergebnis der Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Kaltlichtspiegel (unten).

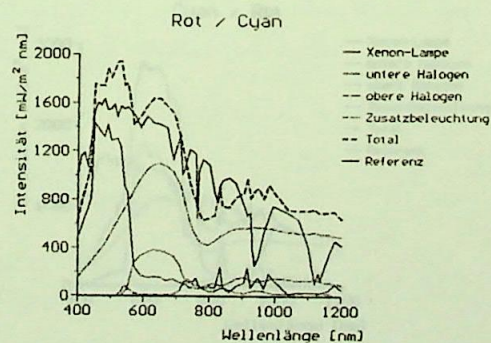


Abbildung 51: Ergebnis der Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Rotspiegel (unten) und Cyanspiegel (oben).



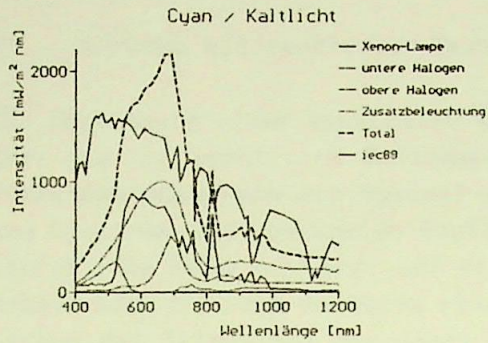


Abbildung 52: Ergebnis der Messung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Cyanspiegel (unten) und Kaltlichtspiegel (oben).

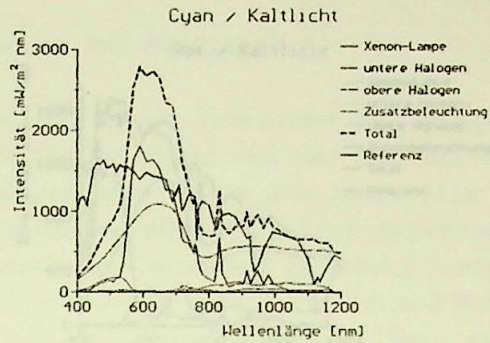


Abbildung 53: Ergebnis der Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Cyanspiegel (unten) und Kaltlichtspiegel (oben).

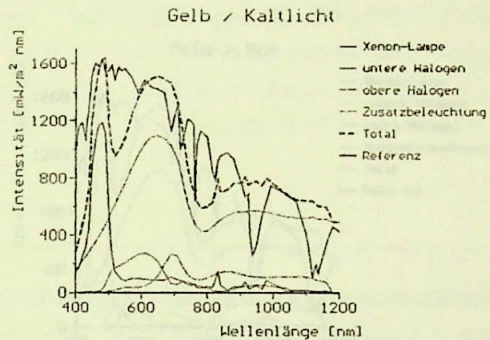


Abbildung 54: Ergebnis der Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Gelbspiegel (unten) und Kaltlichtspiegel (oben).

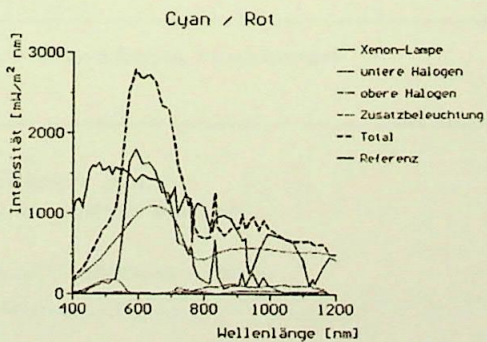


Abbildung 55: Ergebnis der Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Cyanspiegel (unten) und Rotspiegel (oben).



# 6 Rechnen mit spektralen Verteilungen und 5 Rot / Kaltlicht

Zur Berechnung einer spektralen Verteilung des Teststrahls aus den spektralen Beiträgen der Teststrahlungsquelle und der Transmissionskurven der Spiegel sowie der spektralen Empfindlichkeitskurven der Teststrahlungsmessung (die Messwerte) erst auf eine gemeinsame Wellenlänge umgerechnet werden. Man erhält dann z.B. das Spektrum einer Lampe mit der spektralen Intensitätsverteilung durch Multiplikation der Intensität der Lampe mit der spektralen Empfindlichkeit der Teststrahlungsmessung an jeder Wellenlänge. Für die Integration diskret gegebener Funktionen sind eine Vielzahl numerischer Algorithmen bekannt. In der Testebene wurde die Hilfsprogramme, die für die Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Rotspiegel (oben) und Kaltlichtspiegel (unten).

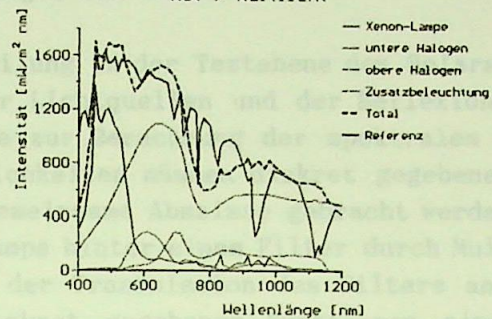


Abbildung 56: Ergebnis der Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Rotspiegel (oben) und Kaltlichtspiegel (unten).

Abbildung 57 zeigt ein Liniendiagramm mit dem Titel 'Gelb / Rot'. Die Y-Achse ist mit 'Intensität [mW/m² nm]' beschriftet und reicht von 0 bis 1600. Die X-Achse ist mit 'Wellenlänge [nm]' beschriftet und reicht von 400 bis 1200. Es gibt sechs Kurven: 'Xenon-Lampe' (durchgezogene Linie), 'untere Halogen' (gestrichelte Linie), 'obere Halogen' (strichpunktierte Linie), 'Zusatzbeleuchtung' (gepunktete Linie), 'Total' (strichgezogene Linie) und 'Referenz' (durchgezogene Linie). Die Kurven zeigen verschiedene Peaks und Täler im Spektralbereich.

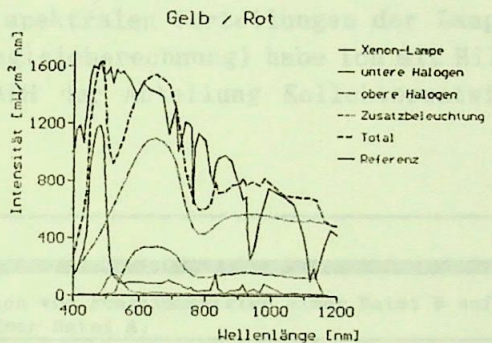


Abbildung 57: Ergebnis der Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Gelbspiegel (unten) und Rotspiegel (oben).

Bezeichnung	Aufgabe
LINEAR.MAS	Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Rotspiegel (oben) und Kaltlichtspiegel (unten).
CONVERT.MAS	Konvertierung eines Wellenlängenbereichs in eine spektrale Intensitätsverteilung.
STRT.MAS	Berechnung des Simulatorspektrums in der Testebene mit Gelbspiegel (unten) und Rotspiegel (oben).
CURVE.MAS	Berechnung des Stroms einer Solarzelle aus dem spektralen Strom.
INTEGRAL.MAS	Berechnung der Intensitätsverteilung nach Definition 1-3 (Abbildung 11.1.1).

Tabelle 18: Hilfsprogramme zur Berechnung mit spektralen Verteilungen

```

- Sortiere die Messwerte in aufsteigender Folge
- pmax := Gesamtlicher Anteil von x + Anzahl Messdaten
- wmax := pmax + 1
-  $\bar{A}_x = \text{Messwert}(pmax) + ((x - \text{Anzahl Messdaten}) - pmax) \cdot (\text{Messwert}(wmax) - \text{Messwert}(pmax))$ 

```

Algorithmus von INTEGRAL.MAS zur Bestimmung des  $\bar{A}_x$ -Quantils:  $0 \leq x \leq 1$ .



## C Rechnen mit spektralen Verteilungen und Statistik

Zur Berechnung einer spektralen Verteilung in der Testebene des Solarsimulators aus den spektralen Beiträgen der Lichtquellen und der Reflexions- und Transmissionskurven der Spiegel sowie zur Berechnung der spektralen Ströme aus Spektren und spektralen Empfindlichkeiten müssen diskret gegebene Funktionen (die Meßwerte) erst auf eine gemeinsame Abszisse gebracht werden. Man erhält dann z.B. das Spektrum einer Lampe hinter einem Filter durch Multiplikation der Intensität der Lampe mit der Transmission des Filters an jeder Stützstelle. Für die Integration diskret gegebener Funktionen sind eine Vielzahl numerischer Algorithmen bekannt /48/. Die Tabelle zeigt die Hilfsprogramme, die für die Rechnungen benutzt wurden. Die Interpolation der Spektren auf eine gemeinsame Abszisse (die Abszisse des Referenzspektrums) geschah mit Hilfe eines linear interpolierenden Algorithmus. Die Integration wurde als Trapezintegration ausgeführt. Der Quelltext der Programme wurde in OMIKRON BASIC bzw. TURBO PASCAL geschrieben und befindet sich auf der Diskette zur Diplomarbeit. Multiplikationen von spektralen Empfindlichkeiten, Transmissions- und Reflexionskurven, spektralen Verteilungen der Lampen und statistische Auswertung der Daten (Ausgleichsrechnung) habe ich mit Hilfe des Datenverarbeitungsprogrammes MULTIGRAPH der Abteilung Kollektorentwicklung durchgeführt.

Bezeichner	Aufgabe
LINPOL.BAS	Interpolation von Funktionswerten einer Datei B auf die Abszisse einer Datei A.
CONVERT.BAS	Konvertierung einer MULTIGRAPH Datendatei *.MGD in eine ASCII Datei anderen Formats.
ETOT.BAS	Berechnung der Bestrahlungsstärke aus einem Spektrum
CURRENT.BAS	Berechnung des Stroms einer Solarzelle aus dem spektralen Strom.
INHOCAI.PAS	Berechnung der Inhomogenität nach Definition 1-3 (Abschnitt III.3.).

Tabelle 14: Hilfsprogramme zu den Rechnungen mit spektralen Verteilungen

```

- Sortiere die Meßwerte in aufsteigender Folge
- prec := Ganzzahliger Anteil von x * Anzahl Meßdaten
- succ := prec + 1
-  $\alpha_x$  = Messwert(prec) + ((x * Anzahl Meßdaten) - prec)
      * (Messwert(succ) - Messwert(prec))

```

Algorithmus aus INHOCAI.PAS zur Bestimmung des  $\alpha_x$ -Quantils;  $0 \leq x \leq 1$ .



## 9 Schaltplan zur Umschalteneinheit

**Schaltplan** Die Abbildung zeigt die Kabelausschaltung der Umschalteneinheit. Ein Teil der Relais zweier TTL-Relaiskarten steuert bis zu 20 Ampere belastbare Relais an. Alle Relais sind in Substellung eingewechselt. Die Bezeichnungen entsprechen den Bezeichnungen in Qualität der Luft KB 0001 (Relaisboard Kommunikation, siehe Anhang E). Durch die 12F- und 12H-Schalter lassen sich Widerstandsmessungen zwischen den Strom- und den Spannungseinheiten durchführen. Bei Vierleiterkontaktierung mit getrennten Strom- und Spannungsanschlüssen an der Solarkarte ist dies eine Möglichkeit, die Güte der Kontaktierung vor der Kennlinienmessung zu überprüfen. Es sind drei Kanäle vorhanden, d.h. bis zu drei Teilseiten eines Mehrfachs können unabhängig voneinander durch ihre Kennlinie gefahren und gemessen werden. Die Umschalteneinheit wurde nach einem Plan vom Elektrotechnischen Institut gefertigt. Die Umschalteneinheit ist betriebsbereit, ihre verschiedenen Schaltzustände sind in der Luft KB 0001 T19 definiert (vergleiche Anhang E).

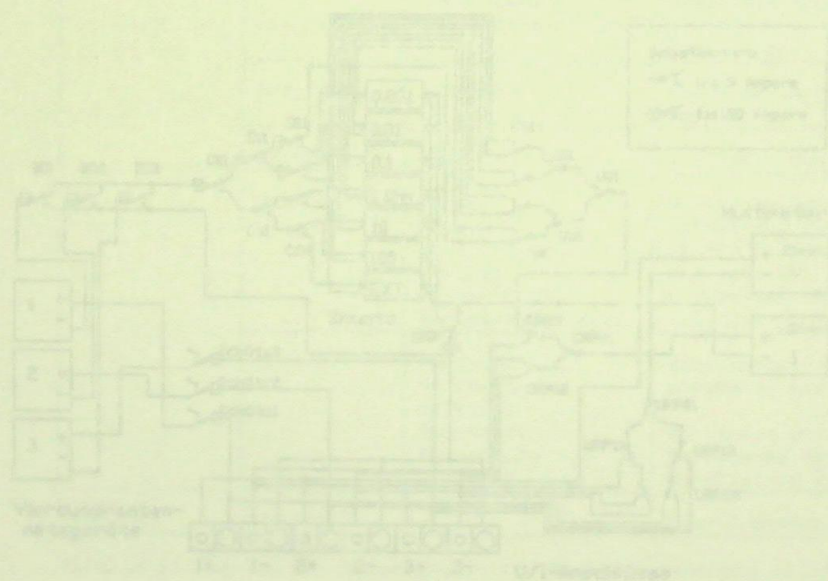


Abbildung 99: Kabelausschaltung in der 3-Kanal-Umschalteneinheit.



## D Schaltplan zur Umschalteinheit

### Schaltplan

Abbildung 58 zeigt die Meßbereichumschaltung in der Umschalteinheit. Ein Teil der Relais zweier TTL-Relaiskarten steuert bis zu 20 Ampère belastbare Relais an. Alle Relais sind in Ruhestellung eingezeichnet. Die Bezeichner entsprechen den Bezeichnern im Quelltext der Unit RB\_COMN (Relaisboard Communication, siehe Anhang E). Durch die URP- und CRM-Schalter lassen sich Widerstandsmessungen zwischen den Strom- und den Spannungseinheiten durchführen. Bei Vierleiterkontaktierung mit getrennten Strom- und Spannungsanschlüssen an der Solarzelle ist dies eine Möglichkeit, die Güte der Kontaktierung vor der Kennlinienmessung zu überprüfen. Es sind drei Kanäle vorhanden, d.h. bis zu drei Teilzellen eines Mehrfachs können unabhängig voneinander durch ihre Kennlinie gefahren und gemessen werden. Die Umschalteinheit wurde nach meinen Plänen von der Elektronikwerkstatt des Instituts gebaut. Die Umschalteinheit ist betriebsbereit, ihre verschiedenen Schaltzustände sind in der Unit RB\_COMN.TPU definiert (vergleiche Anhang E).

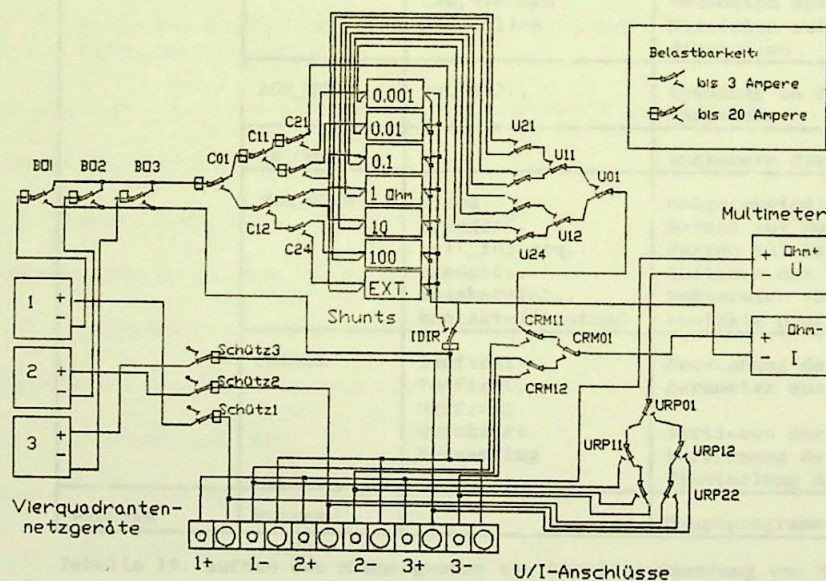


Abbildung 58: Meßbereichumschaltung in der 3-Kanal-Umschalteinheit.

1. Diese angeordnete Version 2.0 des Hauptprogramms ist Voraussetzung für die Messung nach dem Verfahren der selbstkonsistenten Verteilungen.

2. Die Bezeichner bedeuten in der Reihenfolge ihrer Aufführung: Input (Communication), Relais, Bipolar Operational Power Supply, Relaisboard, Digitalmultimeter, Kabelstecker.



Das Meßprogramm zur Kennlinienmessung wurde von mir in der Sprache TURBO PASCAL 5.5 geschrieben. Es existiert eine lauffähige Version 1.0, mit der die Messungen aus den Abbildungen 21/22, Seite 37, gemacht wurden. Das Programm muß in einigen Punkten noch erweitert werden um die Spezifikationen, die sich aus Abbildung 8 (Seite 18) ergeben, voll zu erfüllen<sup>1</sup>. In der Tabelle sind der Übersicht halber nur die dem Benutzer am nächsten stehenden Unterprogramme aufgeführt. Der kommentierte Quelltext der Programmteile (mehr als 30 Din A4 Seiten) befindet sich auf der Diskette. Alle Programmteile sind von mir getestet.

Bestandteile	Bezeichner	Unterprogramme	Aufgaben
UNITS	IN_COMN		Einlesen von Referenzspektrum, spektralen Empfindlichkeiten und den Kalibrierwerten
	OUT_COMN	file_name abspeichern darstellen	Dateiname vergeben Messdaten speichern Messdaten auf dem Bildschirm darstellen
	BOP_COMN	set_BOP..	Spannung an der Solarzelle vorgeben
	RB_COMN		Ansteuern der Umschalteinheit
	DMM_COMN	speed trigger.. wait_for_srq.. readout.. messbereich.. kontaktwiderstand	Meßgeschwindigkeit Befehl zur Messung Warten auf Daten Auslesen der Daten Meßbereich wählen Kontakte prüfen
	CALCUL	Iscfirst Vocfirst MPPfirst Quicksort Newsetting	Berechnung der Kennlinienparameter aus den Daten  Sortieren der Meßdaten Berechnung der nächsten Einstellung des Solarsimulators
PROGRAM	MESSEN		Hauptprogramm

Tabelle 15: Aufbau des Meßprogramms zur Kennlinienmessung von Mehrfachsolarzellen<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Diese sogenannte Version 2.0 des Meßprogramms ist Voraussetzung für die Messung nach dem Verfahren der selbstkonsistenten Verteilungen.

<sup>2</sup> Die Bezeichner bedeuten in der Reihenfolge ihres Auftretens: Input (-Communication), Output, Bipolar Operational Power Supply, Relaisboard, Digitalmultimeter, Calculation.



## F Inhaltsverzeichnis der Diskette zur Diplomarbeit

### Hilfsprogramme zur Rechnung mit spektralen Verteilungen:

LINPOL.BAS  
CONVERT.BAS  
E\_TOT.BAS  
CURRENT.BAS

### Messprogramm Version 1.0:

IN\_COMN.TPU  
OUT\_COMN.TPU  
BOP\_COMN.TPU  
RB\_COMN.TPU  
DM4\_COMN.TPU  
CALCUL.TPU  
MESSEN.PAS

### Programm zur Ansteuerung des Spektralradiometers:

GER\_COMN.PAS

### Spektren aus dem Katalog:

WF1QU.MGD .. WFSQU.MGD MGD = MULTIGRAPH Datendatei  
LI1QU.MGD .. LI4QU.MGD

und die zugehörigen MGG-Dateien MGG = MULTIGRAPH Graphikdatei

### Spiegel aus dem Katalog:

GELB, CYAN, KALT, ROT, .MGD und .MGG

### Referenzspektrum aus der IEC Norm (1989):

IEC89.MGD und .MGG

### Transmission der SFK-Filter aus Schott-Daten:

SFKR.MGD und .MGG

### Spektrale Verteilung der Halogenlampen:

HALOE.MGD und .MGG

### Spektrale Verteilung der Xenonlampe und AM0-Spektrum:

X25M.MGD und .MGG

### Spektrale Empfindlichkeit der Testzelle GaAs/Si:

SRTAN.MGD und .MGG



# Literaturverzeichnis

- /1/ K.Heidler, V.Wittwer, J.Beier, A.Raicu, A.Schönecker, A.Zastrow, "Abschlußbericht Forschungsvorhaben 03E8650B des Bundesministeriums für Forschung und Technologie", FhG ISE, (1990)
- /2/ K.Heidler, B.Müller-Bierl, 10th European PVSEC, Lisbon, (1990)
- /3/ H.Ibach, H.Lüth, Festkörperphysik, Springer Berlin Heidelberg London Paris Tokyo, (1988)
- /4/ W.Shockley, W.T.Read, Physical Review 87, 835 (1952)
- /5/ M.A.Green, Solar Cells, University of New South Wales, (1986)
- /6/ CEI IEC 904-3, International Standard, (1989)
- /7/ H.Haken, H.C.Wolf, Atom- und Quantenphysik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo (1987)
- /8/ S.M.Sze Physics of Semiconductor Devices, Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore, (1981)
- /9/ K.Bücher, A.Schönecker, 10th European PVSEC, Lisbon, (1990)
- /10/ G.F.Virshup, 21th IEEE PVSEC, Kissimmee, (1990)
- /11/ L.M.Fraas, J.E.Avery, P.E.Gruenbaum, R.J.Ballantyne, W.E.Daniels, PVSEC-5, Kyoto (1990) 89-94
- /12/ K.Emery, C.Osterwald, Current Topics in PV 3, (1988)
- /13/ M.Bennett, R.Podlesny, 21th IEEE PV Spec.Conf., Kissimmee, (1990)
- /14/ B.Sopori, C.Marshall, K.Emery, 21th IEEE PVSC, Kissimmee, (1990)
- /15/ J.Burdick, T.Glatfelter, Solar Cells 18, 304-314 (1986)
- /16/ B.Scheppat, R.Geyer, P.Lechner, H.Rübel, M.Gorn, N.Kniffler, Phototronics Solartechnik GmbH., Putzbrunn, (1990)
- /17/ K.Emery, C.R.Osterwald, T.Glatfelter, J.Burdick, G.Virshup, Solar Cells 24, (1988) 371-380
- /18/ K.A.Emery, C.R.Osterwald, Solar Cells 17, 253-274 (1986)
- /19/ Requirements for Reference Solar Cells, IEC 904-2, (1989)
- /20/ C.R.Osterwald, K.A.Emery, D.R.Myers, R.E.Hart, 21th IEEE PVSC, Kissimmee, (1990) 17A-6 ff.
- /21/ J.Metzdorf, T.Wittchen, B.Nawo, W.Möller, PVSEC-5, Kyoto, (1990) 705-708
- /22/ R.Matson, K.Emery, R.Bird, Solar Cells 11, (1984) 105-145
- /23/ C.H.Seaman, Jet Propulsion Laboratory, (1981)
- /24/ C.H.Seaman, Solar Energy 29 No.4, (1982) 291-298



- /25/ ASTM Standard E 973-83, Determination of the spectral mismatch parameter between a photovoltaic device and a photovoltaic reference cell, (1983)
- /26/ R.Shimokawa, F.Nagamine, M.Nakata, K.Fujisawa, Y.Hamakawa, Japanese Journal of Applied Physics 28, (1989) 845-848
- /27/ T.Glatfelter, J.Burdick, 19th IEEE PVSEC, New Orleans, (1987) 1187-1193
- /28/ K.Heidler, Reisebericht USA, FhG ISE, (1990)
- /29/ K.Bücher, Reisebericht Japan, FhG ISE, (1990)
- /30/ F.Schwabl, Quantenmechanik, Springer Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, (1988)
- /31/ K.Heidler, J.Beier, H.Fischer, S.Kunzelmann, A.Zastrow, 6. Internationales Sonnenforum, Berlin, (1988)
- /32/ K.Heidler, J.Beier, 8th European PVSEC, Florence, (1988)
- /33/ K.Heidler, H.Fischer, S.Kunzelmann, 9th Europ. PVSEC, Freiburg, (1989)
- /34/ K.Heidler, J.Beier, H.Fischer, S.Kunzelmann, A.Zastrow, Euro-GaAs PV working meeting, Sophia Antipolis, (1989)
- /35/ K.Bücher, K.Heidler, 5th PVSEC, Kyoto, (1990)
- /36/ M.V.Klein, T.E.Furtak, Optik, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, (1988)
- /37/ CEI-IEC, Solar simulator performance requirements, (1987)
- /38/ A.Päßler, Diplomarbeit Fachhochschule Furtwangen, FhG ISE, 1990
- /39/ J.Honerkamp, Stochastische dynamische Systeme, VCH, (1990)
- /40/ I.N.Bronstein, K.A.Semendjajew, Ergänzende Kapitel zum Taschenbuch der Mathematik, Harri Deutsch, Thun Frankfurt (1986)
- /41/ K.A.Emery, C.R.Osterwald, 21th IEEE PV conf. Kissimmee, (1990) 17-A12
- /42/ F.Kohlrausch, Praktische Physik I,II , Teubner Stuttgart, (1962)
- /43/ KEITHLEY, Low Level Measurements, Keithley Instruments Ohio USA, (1984)
- /44/ A.Goetzberger, V.Wittwer, Sonnenenergie, Teubner, (1989)
- /45/ A.Jung, Absolutkalibrierung eines Spektralradiometers, Diplomarbeit Universität Freiburg / FhG ISE, (1991)
- /46/ E.Hecht, Optics, Addison-Wesley, (1987)
- /47/ D.R.Myers, Uncertainty Analysis and Quality Control Applications to Radiometric Data", National Bureau of Standards Maryland USA, (1986)
- /48/ W.H.Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolsky, W.T.Vetterling, Numerical Recipes, Cambridge University Press New York New Rochelle Melbourne Sydney, (1988)