



Geographisches Institut der
Universität Bern

Globalstrahlungsmessung mit Solarzellen

Seminararbeit

Mai 2002

vorgelegt von:

Erich Fischer
Längackerweg 4a
3048 Worblaufen

Betreuung:
Dr. W. Eugster

Abstract

Global radiation measurement by pyranometers is expensive, especially if taken simultaneously at several different places. In this paper a simple, cheap sensor by means of a photovoltaic cell is presented. The intercepted radiation produces a current in the solar cell, which can be converted to a voltage that is almost linearly related radiation flux densities.

During calibration measurements a good correlation of photovoltaic cell voltage measurements and global radiation was found. Radiation values up to 800 W m^{-2} can be converted by a linear regression fit. Higher radiation is systematically underestimated by such a linear regression. A regression fit of a higher degree is necessary for obtaining a more accurate representation of the global radiation.

Photovoltaic cells prove to be suitable for measurements of mean and total global radiation and for measurements of present global radiation with an accuracy of about $\pm 20 \text{ W m}^{-2}$.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Methode	3
2.1	Sunceram II Solarzellen	3
2.2	Strahlungsmessgerät	4
2.3	Kalibrierung	5
3	Resultate	5
3.1	Strahlungsgang	5
3.2	Messwerte	6
3.3	Kreuzkorrelation	8
4	Diskussion	9
4.1	Regressionen	9
4.2	Fehlerquellen	10
5	Schlussbemerkungen	12
	Literaturverzeichnis	13
A	Anhang	14

1 Einleitung

Ziel meiner Arbeit ist die Entwicklung und Kalibrierung eines billigen, genauen Strahlungsmessgerätes mithilfe einer Solarzelle. Präzise Messungen mit Pyranometern sind teuer, besonders wenn gleichzeitig an verschiedenen Standorten gemessen werden soll. Die Strahlungsmessgeräte mit Solarzellen wurden entwickelt und kalibriert für die spätere Verwendung im Rahmen einer Dissertation über den Einfluss von abiotischen Stress- und Störungsfaktoren auf die Biodiversität alpiner Pflanzengemeinschaften. Im Rahmen dieser Forschung wird Temperatur, Feuchtigkeit, Wind und Globalstrahlung an 14 verschiedenen Standorten in zwei Untersuchungsgebieten im Schweizer Alpenraum gemessen.

Die Solarzellen wurden von mir auf dem Dach des Geographischen Instituts der Universität Bern während mehreren Tagen getestet und mit einem Pyranometer kalibriert. Für jede Solarzelle wurde eine Regression ermittelt, die eine möglichst genaue Umrechnung der Solarzellenspannung [mV] in Solarstrahlung [W m^{-2}] ermöglicht.

Im folgenden Kapitel wird die Herstellung des Messgerätes und die Methode der Eichmessung beschrieben. Die Resultate der Eichmessung und die gefundenen Regressionen für die verschiedenen Zellen werden im dritten Kapitel vorgestellt. Das letzte Kapitel dient der Diskussion der Resultate, der Abschätzung des Messfehlers der Solarzellen und der Präsentation möglicher Fehlerquellen.

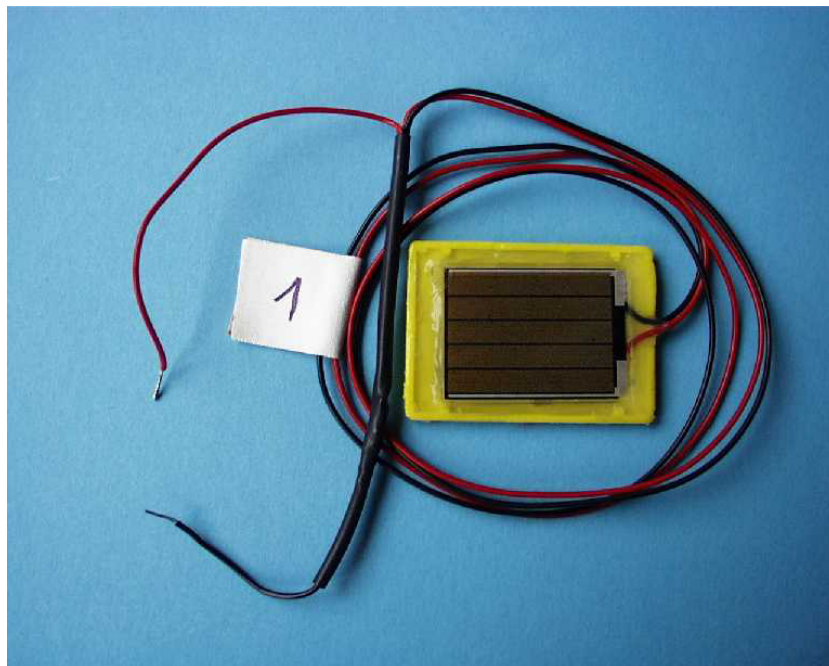


Abbildung 1: Messfühler mit Solarzelle ($2.4 \times 3.3 \text{ cm}^2$) auf gelben Trägermaterial. Der Widerstand ist im schwarzen Schrumpfschlauch versteckt.

2 Methode

2.1 Sunceram II Solarzellen

Kernstück des Messgerätes ist eine Solarzelle vom Typ Sunceram II Cell for Outdoor Use¹. Diese Solarzelle verwendet kombinierte Dünnschicht-Halbleiter². Sunceram II Solarzellen sind besonders gut geeignet für den Gebrauch im Freien, da sie wetterfest sind und eine hohe spektrale Sensitivität über ein breites Spektrum von Wellenlängen aufweisen.

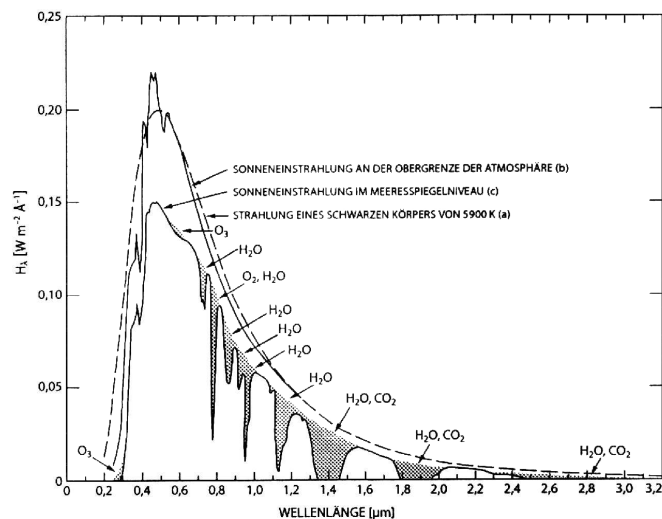


Abbildung 2: Spektrale Verteilung der Strahlungsintensität (a) eines Schwarzen Körpers der Temperatur 5900 K (Sonne) im Abstand 1 AE, (b) der Sonne an der Obergrenze der Erdatmosphäre, (c) der Sonne an der Erdoberfläche bei senkrechtem Strahlungseinfall. Die Schattierung markiert die Extinktionswirkung der wichtigsten atmosphärischen Absorber.

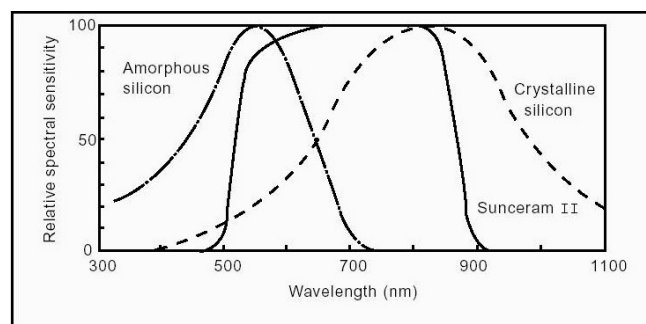


Abbildung 3: Relative spektrale Sensitivität einer amorphen Silikonsolarzelle, einer Sunceram II Solarzelle und einer kristallinen Silikonsolarzelle.

¹Panasonic, Sunceram II cell for outdoor use. Model No. BP-24331 8S. Bezug bei Conrad Elektronik.

²thin-film compound semiconductors

In Abbildung 2 ist die spektrale Verteilung der solaren Strahlung am oberen Rand der Atmosphäre und auf Meereshöhe dargestellt und in Abbildung 3 wird die relative spektrale Sensitivität der verschiedenen Solarzelltypen gezeigt. Strahlung mit einer Wellenlänge kleiner als 500 nm und grösser als 900 nm liegt ausserhalb des Sensitivitätsbereichs der Sunceram II Solarzellen. Das Intensitätsmaximum der von der Erdatmosphäre unbeeinflussten Sonnenstrahlung liegt bei $\lambda = 470$ nm. Die Atmosphäre bewirkt eine Verschiebung dieses Wertes nach $\lambda = 550$ nm (Gelbgrün) nahe der Erdoberfläche (WARNECKE 1997) [1]. Dieses Intensitätsmaximum liegt innerhalb des Sensitivitätsbereichs der Sunceram II Zelle. Die Sunceram II Solarzellen sind sowohl wegen der spektralen Sensitivität, als auch wegen der stabileren Spannungserzeugung besser geeignet als amorphe und kristalline Silikonsolarzellen. Bei steigender Temperatur nimmt die erzeugte Spannung mit $0.15\%/^{\circ}\text{C}$ ab (PANASONIC 1998) [2]. Bei extremen Temperaturunterschieden muss somit die Temperaturcharakteristik der Solarzelle mitberücksichtigt werden.

2.2 Strahlungsmessgerät

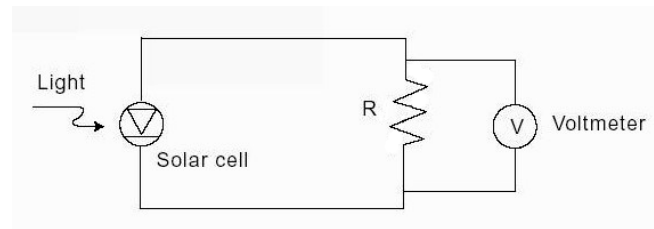


Abbildung 4: Schematischer Kreislauf des Strahlungsmessgerätes.

Ein Strahlungsmessgerät besteht aus einer Sunceram II Solarzelle mit der Fläche von $2.4 \text{ cm} \times 3.3 \text{ cm}$ (PANASONIC 1998) [2]. An die beiden Elektroden ist je ein Draht angelötet und ein Widerstand von 150Ω parallelgeschaltet (vgl. Abbildung 4). Der Widerstand ist so gewählt, dass die erzeugten Spannungen in einem gut messbaren Bereich liegen und auch bei grossen Strahlungswerten gut unterschieden werden können, was bei einem hohen Widerstand nicht möglich wäre. Mit dem gewählten Widerstand wird ein nahezu linearer Zusammenhang im niedrigen Strahlungsbereich und eine quadratische Zunahme im höheren Strahlungsbereich erwartet. Die erzeugte Spannung wird mit einem Voltmeter gemessen und kann mit einem Datalogger über längere Zeit gespeichert werden.

Die Solarzellen sind mit Silikonmasse in eine Kunststofffassung eingegossen (vgl. Abbildung 1). Mit dieser Fassung wird die Zelle auf einen Metallwinkel geklebt, der dann an die Messstation montiert wird, so dass die Solarzelle im Feld immer möglichst genau horizontal ausgerichtet werden kann.

2.3 Kalibrierung

Als Referenzgerät für die Kalibrierung wurde ein Pyranometer³ verwendet, das die Strahlung über einen thermischen Detektor misst. Dieses Messgerät deckt ein Strahlungsspektrum von 305–ca.2800 nm ab. Die Temperaturempfindlichkeit beträgt höchstens $\pm 1\%$ im Bereich zwischen -10°C und $+40^\circ\text{C}$ und der kombinierte Kosinus- und Azimutfehler beträgt $\pm 3\%$ bei einem Sonnenstand von 10° (KIPP & ZONEN 1986) [3]. Die Werte wurden für das Pyranometer und für die Solarzellen über eine Minute gemittelt um kurzzeitige Störungen herauszufiltern. Die Eichmessungen wurden auf dem Dach des Geographischen Instituts der Universität der Bern vom 24.–27.März 2002⁴, vom 17.–23.April 2002⁵ und vom 27.–30.April 2002⁶ durchgeführt. Jede Messperiode enthält jeweils wechselhafte und sonnige Tage.

3 Resultate

3.1 Strahlungsgang

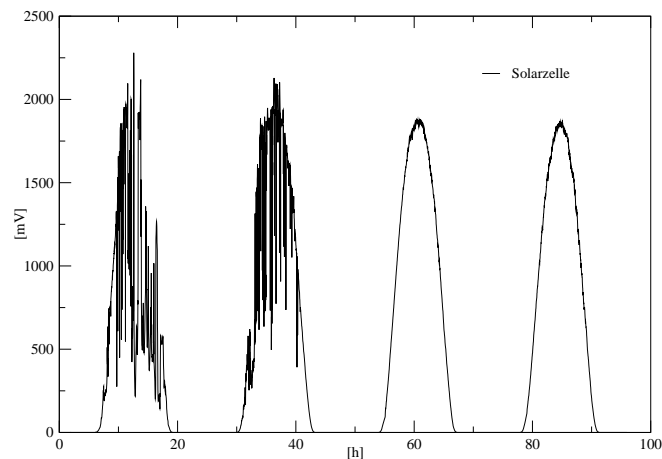


Abbildung 5: Strahlungsgang an zwei wechselhaften und zwei sonnigen Tagen (24.–27. März 2002) auf dem Dach des Geographischen Institut der Universität Bern gemessen mit einer Solarzelle.

Sowohl mit Hilfe der Solarzellen, als auch mit dem Pyranometer wird *Globalstrahlung* gemessen. Abbildung 5 zeigt einen typischen Strahlungsgang, gemessen mit einer Solarzelle⁷, an zwei wechselhaften und zwei sonnigen Tagen. Der Einfluss der Wetterbedingungen auf die Globalstrahlung kommt zum Ausdruck in den häufigen, starken Fluktuationen der Strahlung während den ersten beiden, wechselhaften Tagen und dem glatten Strahlungsgang während

³KIPP & ZONEN SOLARIMETER

⁴Solarzellen 1,4,5,7,9,10,11,13,14,15,16,18

⁵Solarzellen 19,20,21,22

⁶Solarzellen 23,24,25

⁷Solarzelle 10

den beiden sonnigen Tagen. Die beiden sonnigen Tage zeigen nur während dem Strahlungsmaximum am Mittag geringe Schwankungen, die wahrscheinlich durch Zirren verursacht wurden. Auffällig ist, dass die Strahlung an beiden wechselhaften Tagen höhere Strahlungsmaxima erreicht, als an den sonnigen Tagen. Dies entspricht dem erwarteten Gang der Globalstrahlung. Die Globalstrahlung ist die Summe der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung (WARNECKE 1997) [1]. An einem wechselhaften Tag ist die diffuse Himmelsstrahlung höher, da die kurzwellige Strahlung teilweise von den Wolken gegen den Erdboden reflektiert wird. Einerseits wird am Erdboden reflektierte Strahlung von der Wolkenunterseite wiederum zurückreflektiert und andererseits wird Sonnenstrahlung am Rand von Wolken gegen den Erdboden reflektiert. Durch die zeitweise hohe diffuse Himmelsstrahlung kann die Globalstrahlung an wechselhaften Tagen höhere Werte erreichen.

3.2 Messwerte

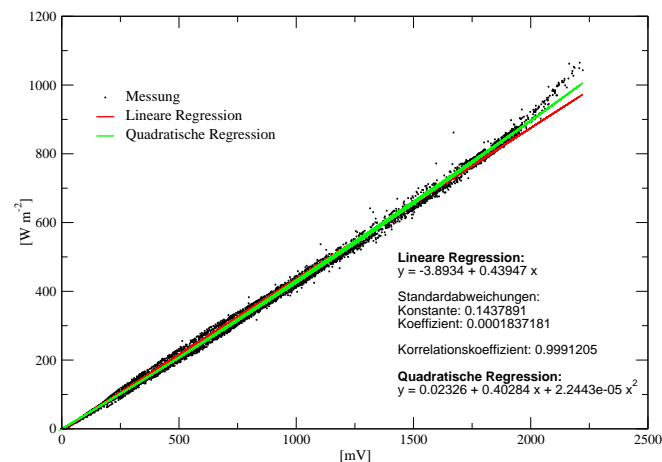


Abbildung 6: Streudiagramm der Solarzelle 22 (x-Achse) und des Pyranometers (y-Achse) mit linearer und quadratischer Regression.

Zur genaueren Auswertung werden die Messungen in Abbildung 6 in einem Streudiagramm verglichen. Auf der x-Achse sind die Werte der Solarzelle 22 und auf der y-Achse die Werte des Pyranometers dargestellt. Auffällig ist eine hohe lineare Korrelation der Messdaten. Diese beträgt im Fall der Solarzelle 22, $r = 0.9991205$. Wie erwartet (vgl. Kapitel 2.2) deutet Abbildung 6 darauf hin, dass zwischen kleinen Werten ein linearer Zusammenhang besteht, aber im höheren Strahlungsbereich die Messungen nicht linear korrelieren. Die Werte bis ca. 800 W m^{-2} werden durch eine lineare Regression gut repräsentiert. Im Fall der Solarzelle 22 ist dies die Funktion $y = -3.893(\pm 0.14) + 0.440(\pm 0.0002)x$. Werte grösser als 800 W m^{-2} werden von der linearen Regression systematisch unterschätzt und es muss eine andere Regression gesucht werden.

Die quadratische Regression⁸ ist als Näherung für Strahlungswerte bis 900 W m^{-2} ausreichend.

⁸Polynomfit 2. Grades von der Form $y = ax^2 + bx + c$

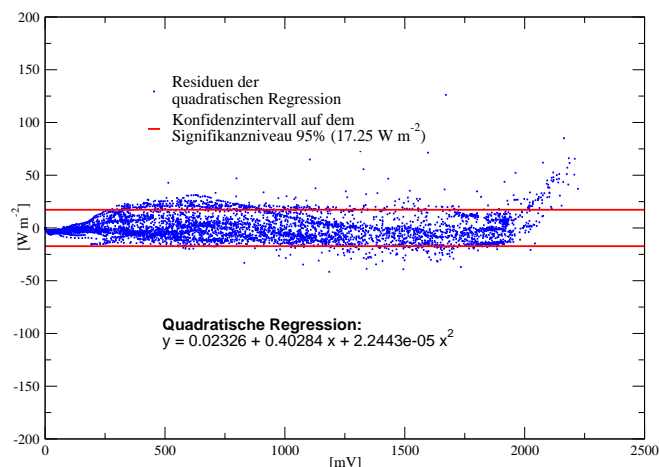


Abbildung 7: Residuen der quadratischen Regression zum Streudiagramm der Solarzelle 22 und des Pyranometers (vgl. Abbildung 6 mit zugehörigem Konfidenzintervall auf dem Signifikanzniveau 95%).

Abbildung 7 zeigt die Residuen für die quadratische Regression. Das Konfidenzintervall auf dem Signifikanzniveau 95% zu den Residuen der quadratischen Regression beträgt im Fall der Solarzelle $22 \pm 17.25 \text{ W m}^{-2}$. Für Strahlungswerte über 900 W m^{-2} werden die Abweichungen viel grösser und die quadratische Regression ist eine ungeeignete Funktion. Die Werte werden damit in diesem Bereich mit einer Abweichung von bis zu 100 W m^{-2} systematisch unterschätzt.

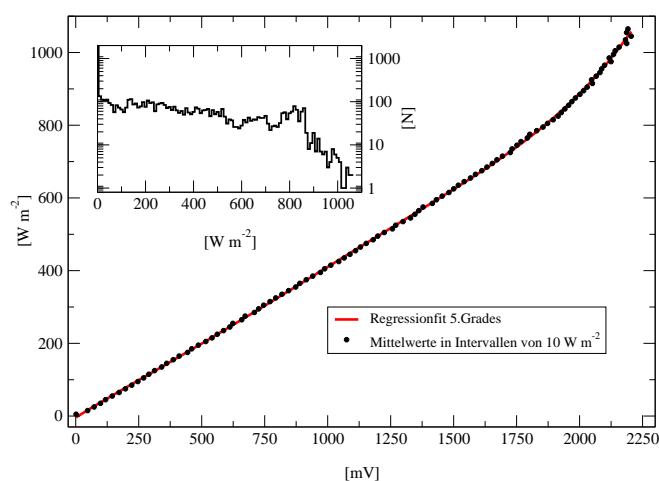


Abbildung 8: Streudiagramm der Klassenmittelwerte der Solarzelle 19 (x-Achse) und des Pyranometers (y-Achse) mit zugehöriger Regression 5. Grades. Die Anzahl Werte pro Klasse ist in der eingesetzten Grafik dargestellt.

Für die Eichmessungen der Solarzellen 1–18 erscheint die quadratische Regression als optimale

Funktion (vgl. Anhang), da im Laufe dieser Messperiode, bedingt durch die Witterung und die Jahreszeit⁹, kaum Messwerte über 900 W m^{-2} erreicht wurden.

In Abbildung 8 sind die Messwerte der Solarzelle 19 in Klassen von 10 W m^{-2} gemittelt und zusammengefasst um eine zu hohe Gewichtung der grossen Anzahl von niedrigen Strahlungswerten zu verhindern. Die Grösse der verschiedenen Klassen wird in der kleinen Grafik oben links dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Anzahl Werte pro Klasse mit zunehmender Strahlung abnimmt. Für die Klassenmittelwerte wird eine Regression gesucht, welche auch für Werte über 900 W m^{-2} gültig ist. Die dargestellte Regression fünften Grades erfüllt diese Bedingung und repräsentiert auch hohe Strahlungswerte gut. Es ist jedoch nicht sicher, welche Regression gefunden würde, wenn grössere Strahlungswerte gemessen worden wären. Vermutlich wäre eine hyperbelartige Funktion der Art

$$y = \frac{a}{x_{max} - x} + bx + c \quad (1)$$

mit

$$\begin{aligned} a &\approx 50'000 \\ b &\approx 0.40 \\ c &\approx 0 \\ x_{max} &\approx 2'500 \end{aligned}$$

am Besten, da bei kleiner Einstrahlung ein nahezu lineares Verhalten der Solarzellen festgestellt wurde, das bei hohen Einstrahlungen asymptotisch einem Sättigungswert entgegenstrebt (x_{max}).

3.3 Kreuzkorrelation

Zur Überprüfung der Gleichzeitigkeit der Daten wird eine Kreuzkorrelation zwischen der Solarzelle 10 und dem Pyranometer durchgeführt. Eine Zeitverschiebung zwischen Solarzelle und Referenzgerät kann entstehen, falls eines der beiden Geräte nicht genau horizontal ausgerichtet ist oder falls die Messungen der beiden Geräte mit zwei nicht synchronisierten Loggern aufgezeichnet und gemittelt werden. Letzteres ist bei dieser Eichmessung nur für die Solarzellen 15, 16 und 18 möglich, da deren Werte mit einem anderen Logger ohne das Referenzgerät aufgezeichnet wurden. Aus der Kreuzkorrelation in Abbildung 9 ist ersichtlich, dass an beiden wechselhaften Tagen eine optimale Gleichzeitigkeit der Daten besteht. An den beiden sonnigen Tagen wird die höchste Korrelation bei einer geringen negativen Zeitverschiebung von 2 Minuten erreicht, wahrscheinlich, weil die Solarzelle nicht optimal horizontal ausgerichtet war, was sich bei wechselhaftem Wetter weniger stark auswirkt.

⁹Die Eichmessungen für die Solarzellen 1-18 wurden 3-Wochen früher als für die Solarzellen 19-22 durchgeführt (vgl. Kapitel 2.3)

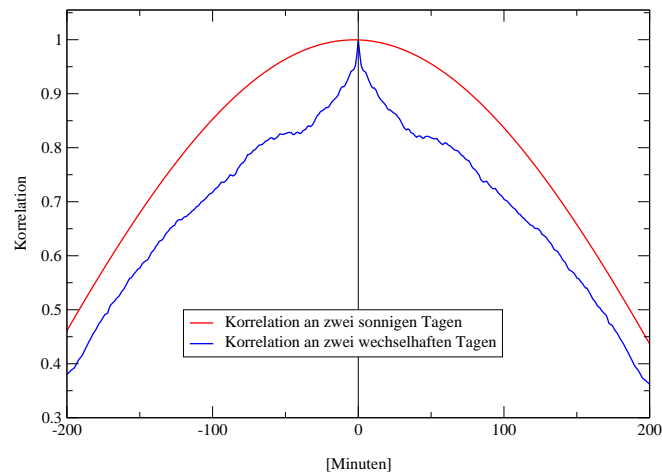


Abbildung 9: Kreuzkorrelation der Solarzelle 10 mit dem Pyranometer an zwei sonnigen Tagen (24.–25. März) (rote Linie) und an zwei wechselhaften Tagen (26.–27. März) (blaue Linie).

4 Diskussion

4.1 Regressionen

Betrachtet man die Resultate aller Solarzellen, fällt auf, dass für die verschiedenen Zellen ähnliche Regressionen gefunden werden. Die Ähnlichkeit der Regressionen ist grösser zwischen den Solarzellen, die gleichzeitig geeicht wurden¹⁰ (vgl. Kapitel 2.3). Die unterschiedlichen Witterungs- und Strahlungsbedingungen während den verschiedenen Messperioden haben wahrscheinlich die Eichung leicht beeinflusst. Die vielen hohen Strahlungswerte in der zweiten und dritten Messperiode führten zum Beispiel zu einer positiven Krümmung ($c \cdot x^2$) der quadratischen Regression der Solarzellen 19–25 und einer negativen Konstante in der linearen Regression (vgl. Tabelle 1). Solarzelle 18 bildet eine Ausnahme und verhält sich wie die Solarzellen 19–25, obwohl sie in der ersten Messperiode geeicht wurde.

Es lohnt sich trotz der Ähnlichkeit der Regressionen für jede Solarzelle eine eigene Regression zu verwenden, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen und den Unterschieden Rechnung zu tragen. Da während den Messperioden nicht maximale Strahlungswerte erreicht wurden, wie sie im Sommer auftreten, ist eine zuverlässige Eichung der Solarzelle für sehr hohe Strahlungswerte nicht möglich. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei der Anwendung der Solarzellen für Werte bis 900 W m^{-2} die quadratische Regression geeignet ist. Für Messwerte bis ca. 800 W m^{-2} ist sogar eine lineare Regression eine hinreichende Näherung. Strahlungswerte über 900 W m^{-2} werden jedoch durch eine lineare und eine quadratische Regression systematisch unterschätzt. Für genaue Messungen über 900 W m^{-2} muss eine Regression höheren Grades verwendet werden. Für die vorhandenen Eichmessungsdaten scheint eine Funktion 5. Grades geeignet zu sein (vgl. Abbildung 8). Zukünftige Arbeiten sollten auch den in Gleichung (1) vorgeschlagenen Zusammenhang prüfen. Falls die Daten für Stationsvergleiche oder Mittelwertmessungen verwendet werden, also keine hohe Genauigkeit erforderlich ist, kann

¹⁰Solarzellen 1–18, 19–22, 23–25

Tabelle 1: Tabelle mit linearer Regression, Standardabweichung der Konstante, Standardabweichung des Koeffizienten, Korrelationskoeffizient und quadratischer Regression zu den verschiedenen Solarzellen.

	Lineare Regression	Standardabw. Konstante	Standardabw. Koeffizient	Korrelation	Quadratische Regression
Zelle 1	$y = 0.31498 + 0.44982 x$	0.1540417	0.0001886503	0.9995564	$y = -0.45708 + 0.46093 x - 7.2496e-06 x^2$
Zelle 4	$y = 0.94722 + 0.44601 x$	0.1507051	0.0001835405	0.9995696	$y = 0.02687 + 0.45895 x - 8.3784e-06 x^2$
Zelle 5	$y = 0.03643 + 0.45465 x$	0.1444762	0.0001790809	0.9996056	$y = -0.26250 + 0.45892 x - 2.8273e-06 x^2$
Zelle 7	$y = 0.21783 + 0.45092 x$	0.1505987	0.0001861066	0.9995602	$y = 0.11453 + 0.45232 x - 9.2344e-07 x^2$
Zelle 9	$y = 1.02680 + 0.48481 x$	0.1542302	0.0002057755	0.9995313	$y = 0.11605 + 0.49774 x - 9.1018e-06 x^2$
Zelle 10	$y = 0.59488 + 0.40627 x$	0.1492287	0.0001733344	0.9994861	$y = 0.46938 + 0.40776 x - 8.8251e-07 x^2$
Zelle 11	$y = 0.98460 + 0.43698 x$	0.1830149	0.0002288387	0.9992260	$y = 0.37838 + 0.44468 x - 4.9010e-06 x^2$
Zelle 13	$y = 0.86308 + 0.43707 x$	0.1435957	0.0001795156	0.9995237	$y = 0.25674 + 0.44475 x - 4.8858e-06 x^2$
Zelle 14	$y = 0.67604 + 0.44689 x$	0.1303013	0.0001664906	0.9996081	$y = -0.01572 + 0.45579 x - 5.7819e-06 x^2$
Zelle 15	$y = 1.80310 + 0.42695 x$	0.2206559	0.0002745890	0.9988459	$y = 0.45226 + 0.44390 x - 1.0605e-05 x^2$
Zelle 16	$y = 1.01450 + 0.41704 x$	0.1924655	0.0002335892	0.9991243	$y = 0.12069 + 0.42794 x - 6.6622e-06 x^2$
Zelle 18	$y = -0.04340 + 0.47921 x$	0.1742400	0.0002425157	0.9992849	$y = 0.09760 + 0.47723 x + 1.3970e-06 x^2$
Zelle 19	$y = -4.87980 + 0.42639 x$	0.1735939	0.0002148707	0.9987228	$y = 0.31934 + 0.37869 x + 2.8529e-05 x^2$
Zelle 20	$y = -3.70370 + 0.41932 x$	0.1555353	0.0001896945	0.9989703	$y = 0.14133 + 0.38494 x + 2.0104e-05 x^2$
Zelle 21	$y = -4.19004 + 0.42645 x$	0.1546189	0.0001916143	0.9989842	$y = 0.33644 + 0.38501 x + 2.4715e-05 x^2$
Zelle 22	$y = -3.89340 + 0.43947 x$	0.1437891	0.0001837181	0.9991205	$y = 0.02326 + 0.40284 x + 2.2443e-05 x^2$
Zelle 23	$y = -4.26760 + 0.41228 x$	0.2716111	0.0003006397	0.9984726	$y = 0.27752 + 0.37103 x + 2.2591e-05 x^2$
Zelle 24	$y = -3.35600 + 0.42536 x$	0.2727582	0.0003119570	0.9984551	$y = 1.03620 + 0.38367 x + 2.3589e-05 x^2$
Zelle 25	$y = -3.34880 + 0.41116 x$	0.2932410	0.0003242401	0.9982144	$y = 0.96263 + 0.37164 x + 2.1611e-05 x^2$

die lineare Regression verwendet werden und für Werte ab 800 W m^{-2} die systematische Unterschätzung addiert werden.

4.2 Fehlerquellen

Eine mögliche Fehlerquelle bei der Messung mit Solarzellen ist die nicht optimal horizontale Ausrichtung der Zelle. Schon geringe Abweichungen von der Horizontalen können das Resultat verfälschen. Die momentane direkte Strahlung lässt sich berechnen mit der Formel $I = S_0 \cdot \sin \varphi$, wobei S_0 die Solarkonstante und φ der Winkel zwischen der Horizontalen und der Einfallrichtung der Solarstrahlung ist. Eine Abweichung der Zelle um den Winkel φ aus der Horizontalen verändert die gemessene Strahlung um den Faktor $\sin \varphi$.

Es hat sich gezeigt, dass sich nach Niederschlägen kleine Wassertröpfchen auf der Solarzelle bilden können, obwohl die Zellen so eingegossen sind, dass sich das Wasser nicht auf der Solarzelle sammeln kann. Die Wassertröpfchen beeinflussen die kurzwellige Strahlung und somit die Messungen jedoch nicht stark. Einen grösseren Fehler können die nach der Verdunstung zurückbleibenden Schmutzrückstände und andere Verschmutzung der Zellenoberfläche verursachen.

Der Einfluss der Temperatur muss nur bei extremen Temperaturunterschieden berücksichtigt werden. Ein Temperaturunterschied von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ hat eine Spannungsänderung von 1.5% zur

Folge. Es muss berücksichtigt werden, dass das Sensitivitätsspektrum der Solarzellen nur von einer Wellenlänge von 500–900 nm reicht (vgl. Kapitel 2.1). Es wird also nur die Strahlung in diesem Spektralbereich gemessen. Da dieser Bereich jedoch einen wesentlichen Ausschnitt des gesamten kurzwelligen Spektrums abdeckt, dürften die Solarzellen verlässliche Messungen für einkommende Solarstrahlung erlauben. Die Genauigkeit der Messungen einer Solarzelle beträgt ca. $\pm 20 \text{ W m}^{-2}$ für Werte bis 900 W m^{-2} . Für eine Fehlerabschätzung stärkerer Strahlung wären neue Eichmessungen mit einer grösseren Anzahl hoher Strahlungswerte erforderlich.

5 Schlussbemerkungen

Solarzellen sind einfache, billige Strahlungsmessgeräte. Sie sind besonders gut geeignet für den Vergleich der Globalstrahlung an zahlreichen Standorten und zur Messung der durchschnittlichen und über Zeitabschnitte integrierten Globalstrahlung. Die zeitliche Auflösung erlaubt auch die genaue Beobachtung des Tagesstrahlungsganges oder eine relative genaue Messung momentaner Globalstrahlung.

Eine Solarzelle eignet sich jedoch nicht für die hochpräzise Messungen der Globalstrahlung mit hoher zeitlicher Auflösung und die genaue Messung hoher Strahlungsmaxima. Folgende Einschränkungen und Probleme sollten beachtet werden. Es ist kaum möglich die Solarzelle genau horizontal auszurichten. Solarzellen sind empfindlich und zerbrechen schon bei geringen Schlägen und Spannungen auf der Glasoberfläche. Die Solarzellen sind nicht geschützt gegen Wassertröpfchen und Schmutzschichten, die sich auf der Oberfläche bilden können. Der Vorteil der Solarzellen liegt eindeutig in den niedrigen Kosten, in der geringen Grösse und in der Einfachheit der Herstellung.

Literatur

- [1] WARNECKE, G., 1997: Meteorologie und Umwelt. Springer Verlag, Berlin. 90f.
- [2] PANASONIC, 1998: Solar Cells Handbook, Sunceram II, Cell for Outdoor Use.
- [3] KIPP & ZONEN 1986: Calibration Certificate. DELFT, Holland.

Abbildungsverzeichnis

1	Messfühler mit Solarzelle ($2.4 \times 3.3 \text{ cm}^2$) auf gelben Trägermaterial.	2
2	Spektrale Verteilung der solaren Strahlung.	3
3	Relative spektrale Sensitivität der verschiedenen Solarzellentypen.	3
4	Schematischer Kreislauf des Strahlungsmessgerätes.	4
5	Strahlungsgang an zwei wechselhaften und zwei sonnigen Tagen (24.–27. März 2002).	5
6	Streuungsdiagramm zu der Solarzelle 22.	6
7	Residuen der quadratischen Regression für die Solarzelle 22.	7
8	Streuungsdiagramm der Klassenmittelwerte der Solarzelle 19 (x-Achse) und des Pyranometers (y-Achse).	7
9	Kreuzkorrelation der Solarzelle 10 mit dem Pyranometer.	9

Tabellenverzeichnis

1	Tabelle mit Regressionen zu den verschiedenen Solarzellen.	10
---	--	----

A Anhang

	Lineare Regression	Standardabw. Konstante	Standardabw. Koeffizient	Korrelation	Quadratische Regression	σ der Residuen quadr. Regr.
Zelle 1	$y = 0.31498 + 0.44982 x$	0.1540417	0.0001886503	0.9995564	$y = -0.45708 + 0.46093 x - 7.2496e-06 x^2$	8.4107
Zelle 4	$y = 0.94722 + 0.44601 x$	0.1507051	0.0001835405	0.9995696	$y = 0.02687 + 0.45895 x - 8.3784e-06 x^2$	8.1706
Zelle 5	$y = 0.03643 + 0.45465 x$	0.1444762	0.0001790809	0.9996056	$y = -0.26250 + 0.45892 x - 2.8273e-06 x^2$	8.0551
Zelle 7	$y = 0.21783 + 0.45092 x$	0.1505987	0.0001861066	0.9995602	$y = 0.11453 + 0.45232 x - 9.2344e-07 x^2$	8.4710
Zelle 9	$y = 1.02680 + 0.48481 x$	0.1542302	0.0002057755	0.9995313	$y = 0.11605 + 0.49774 x - 9.1018e-06 x^2$	8.4861
Zelle 10	$y = 0.59488 + 0.40627 x$	0.1492287	0.0001733344	0.9994861	$y = 0.46938 + 0.40776 x - 8.8251e-07 x^2$	8.8996
Zelle 11	$y = 0.98460 + 0.43698 x$	0.1830149	0.0002288387	0.9992260	$y = 0.37838 + 0.44468 x - 4.9010e-06 x^2$	10.8520
Zelle 13	$y = 0.86308 + 0.43707 x$	0.1435957	0.0001795156	0.9995237	$y = 0.25674 + 0.44475 x - 4.8858e-06 x^2$	8.4773
Zelle 14	$y = 0.67604 + 0.44689 x$	0.1303013	0.0001664906	0.9996081	$y = -0.01572 + 0.45579 x - 5.7819e-06 x^2$	7.6404
Zelle 15	$y = 1.80310 + 0.42695 x$	0.2206559	0.0002745890	0.9988459	$y = 0.45226 + 0.44390 x - 1.0605e-05 x^2$	12.8620
Zelle 16	$y = 1.01450 + 0.41704 x$	0.1924655	0.0002335892	0.9991243	$y = 0.12069 + 0.42794 x - 6.6622e-06 x^2$	11.3226
Zelle 18	$y = -0.04340 + 0.47921 x$	0.1742400	0.0002425157	0.9992849	$y = 0.09760 + 0.47723 x + 1.3970e-06 x^2$	10.3689
Zelle 19	$y = -4.87980 + 0.42639 x$	0.1735939	0.0002148707	0.9987228	$y = 0.31934 + 0.37869 x + 2.8529e-05 x^2$	9.8209
Zelle 20	$y = -3.70370 + 0.41932 x$	0.1555353	0.0001896945	0.9989703	$y = 0.14133 + 0.38494 x + 2.0104e-05 x^2$	10.0867
Zelle 21	$y = -4.19004 + 0.42645 x$	0.1546189	0.0001916143	0.9989842	$y = 0.33644 + 0.38501 x + 2.4715e-05 x^2$	8.9370
Zelle 22	$y = -3.89340 + 0.43947 x$	0.1437891	0.0001837181	0.9991205	$y = 0.02326 + 0.40284 x + 2.2443e-05 x^2$	8.7995
Zelle 23	$y = -4.26760 + 0.41228 x$	0.2716111	0.0003006397	0.9984726	$y = 0.27752 + 0.37103 x + 2.2591e-05 x^2$	13.8394
Zelle 24	$y = -3.35600 + 0.42536 x$	0.2727582	0.0003119570	0.9984551	$y = 1.03620 + 0.38367 x + 2.3589e-05 x^2$	14.0766
Zelle 25	$y = -3.34880 + 0.41116 x$	0.2932410	0.0003242401	0.9982144	$y = 0.96263 + 0.37164 x + 2.1611e-05 x^2$	15.5859