

1 Einführung

Im alltäglichen Leben werden Solarzellen bei vielen Geräten eingesetzt, wie z.B. die Staumelder an den Autobahnbrücken oder in den Taschenrechnern. So werden in diesem Versuch die charakteristischen Eigenschaften der Si-Solarzelle untersucht. Die Solarzelle soll unter unterschiedlicher Bestrahlungsstärke betrieben werden, und Anhand des Strom und Spannungsverhältnisses der optimale Betriebspunkt (mit maximaler Leistung) ermittelt werden. Als Sonnenersatz wird ein Halogenstrahler eingesetzt, der durch einen Regel-Trenntrafo einstellbar ist. Des Weiteren wird durch die Messungen festgestellt, ob die Si-Solarzelle für die Messung der Beleuchtungs- und der Bestrahlungsstärke geeignet sind.

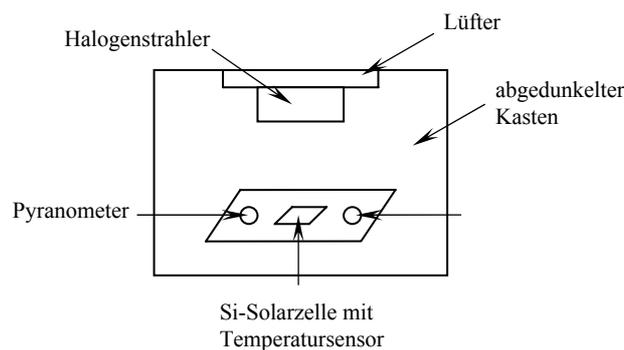
1.1 Geräte

Gerät	Inventarnummer(Zweck)
XYT - Schreiber von ROHDE & Schwarz	82005
Widerstandsdekade	EMT526
Stabilisator von Philips	EMT624
Regeltrafo	ELGE 4044530
ReakTech 5020 (Digital Light Meter) <i>Luxmeter</i>	Keine
Pyranometer CM3 Si-Solarzelle ASE EFG-Cell (5x5cm) Lüfter Halogenstrahler (250V 500W)	66041d
3 mal Metrix MX573	99-05 (für Temperaturmessung) 89017 (Spannung am Pyranometer) 89013 (Strom der Solarzelle)

2 Versuchsdurchführung

2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau sah so aus, dass in einem abgedunkelten Kasten ein Halogenstrahler über den drei Sensoren angebracht war. Die drei Sensoren wurden nach Außen hin mit den Messgeräten verbunden. Der Halogenstrahler wird mit einem Regeltrafo verbunden.



Unter der Solarzelle befindet sich ein Temperatur-Sensor, mit dem die Temperatur der Solarzelle gemessen wird.

Wichtig: Bei jedem Versuch muss darauf geachtet werden, dass die Temperatur der Solarzelle nicht 50°C nicht überschreitet. Um dieses einhalten zu können, mussten wir erstmal eine Umrechnung durchführen. Der Temperatursensor liefert ein Stromsignal derart, dass der Strom in μA gleich der Temperatur in Kelvin ist ($298\mu\text{A}$ bei 25°C).

So mussten wir den Strom für 50°C umrechnen. Nach der Umrechnung durfte der max. Strom von $323.15\mu\text{A}$ (am Besten $315\mu\text{A}$) nicht überschritten werden.

Sollte die Temperatur doch den Grenzwert übersteigen, so muss man die den Lüfter einschalten oder einen kühlen Lappen auf die Solarzelle legen.

2.2 Charakteristik der Lichtquelle

Bei dem ersten Punkt des Versuches, soll die Lichtquelle getestet werden. Der Regeltrafo wird Prozentual ($0\% = 0\text{V}$ und 100% volle Spannung des Regeltrafos) bedient, so dass man in 10% Schritten den Regeltrafo einstellt und dann die Bestrahlungsstärke (als Spannungssignal) des Halogenstrahlers am Digitalmultimeter ablesen kann. Da das Signal als Spannungssignal vorliegt, muss es noch in Bestrahlungsstärke umgerechnet werden (Die Umrechnung erfolgt aus den Werten des Datenblattes $<2 \dots 10\text{V} = 0 \dots 1111,88\text{W}/\text{m}^2 >$):

$$\text{Umrechnung: } U = 2\text{V} + E \cdot \frac{8\text{V}}{1111,88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \rightarrow E = (U - 2\text{V}) \cdot \frac{1111,88\text{W} / \text{m}^2}{8\text{V}}$$

Messungen:

Strahlungsleistung α = Skalenwert des Trafo	Bestrahlungsstärke in (gemessen in V: ohne Umrechnung)	Bestrahlungsstärke in $E(\text{W} / \text{m}^2)$
0%	2,04	5,55
10%	2,10	13,90
20%	2,40	55,60
30%	2,89	123,70
40%	3,54	214,00
50%	4,28	316,88
60%	5,19	443,36
70%	6,10	569,83
80%	7,20	722,72
90%	8,36	883,94
100%	9,42	1031,26

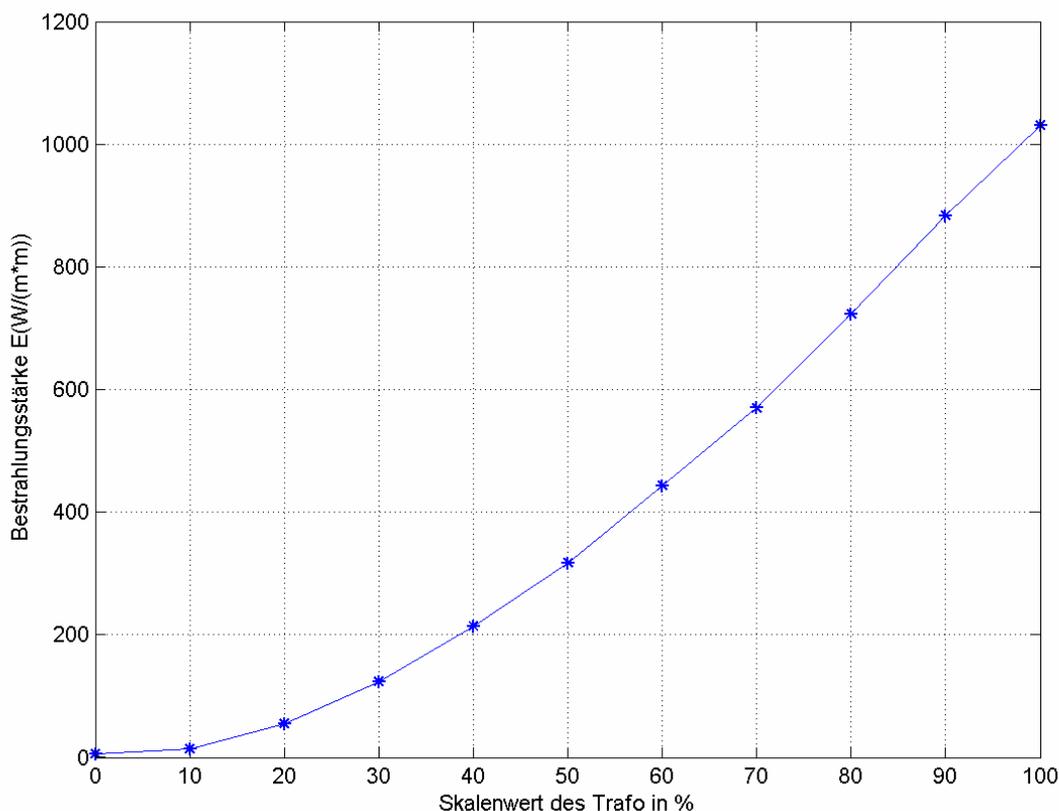
Wenn die Lichtquelle vollständig ausgeschaltet wird, kann man trotzdem immer noch eine Spannung von $2,04\text{V}$ am Digitalmultimeter ablesen. Dieses hängt damit zusammen, dass der

Pyranometer eine Offsetspannung von 2,0V hat. Dieses ist sehr nützlich, da man den Ausfall des Pyranometers feststellen kann. Wenn man eine Spannung von 0V an dem Pyranometer

misst, so ist es dann klar, dass der Pyranometer ausgefallen ist. Des Weiteren kann man erkennen, dass der Pyranometer trotz des abgedunkelten Raumes immer noch ein paar Strahlen auffängt und sie in einen Spannungssignal(hier +0,04V) umwandelt.

So sieht die Kennlinie der Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit von dem Skalenwert des Regeltrafo.

Kennlinie $E_e(\alpha)$:

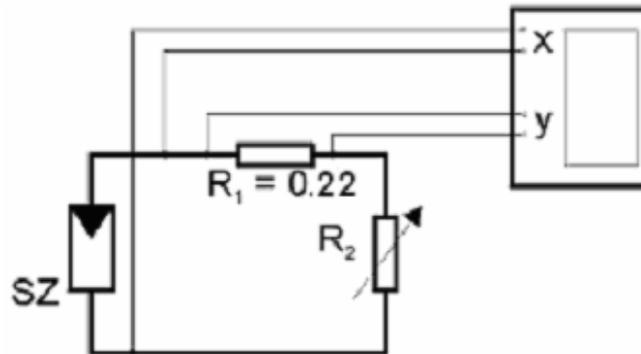


An der Kennlinie kann man erkennen, dass ab dem Skalenwert 60% des Trafos, die Bestrahlungsstärke proportional zu Skalenwert des Trafos ansteigt.

2.3 Aufnahme der Solarzellenkennlinie

Der nächste Teilversuch besteht darin, dass die Kennlinie der Solarzelle aufgenommen wird. Dafür werden zwei Widerstände an die Solarzelle angeschlossen und mit einem x-y-Schreiber die Kennlinie aufgenommen wird.

2.3.1 Versuchsaufbau zur Aufnahme der Solarzellenkennlinie:



Um die x-Achse des x-y-Schreibers zu steuern, wird der x-Eingang parallel an die Solarzelle angeschlossen und misst somit die Spannung an der Solarzelle. Da der x-y-Schreiber nur Spannungen messen kann, musste ein Widerstand (R_1 in der Skizze) hinzugeschaltet werden. Der y-Eingang des x-y-Schreibers ist parallel mit dem Widerstand geschaltet, um den Spannungsabfall an ihm zu messen und somit „den Strom“.

$$\text{Beziehung zwischen R-U-I: } I = \frac{U}{R} \Rightarrow I = \frac{U}{\frac{22}{100}} \Rightarrow I = \frac{50}{11}U$$

Also ist der Strom $50/11$ so groß, wie der Spannungsabfall an diesem Widerstand. Der variable Widerstand R_2 ist eine Widerstandsdekade, mit der man den Widerstand von 1110Ω bis 0Ω einstellt. Man macht damit sozusagen bei 0Ω einen Kurzschluss und Leerlauf bei 1110Ω . Die Solarzelle darf man Kurzschließen!

2.3.2 Versuchsdurchführung zur Aufnahme der Solarzellenkennlinie:

Als erstes wird die Bestrahlungsstärke mit dem Regeltrafo eingestellt. Davor muss natürlich wie im Punkt 2.2 (siehe Umrechnung) der Wert umgerechnet werden und mit dem Regeltrafo eingestellt.

Beispiel 1: soll die Bestrahlungsstärke auf 200W/m^2 eingestellt werden.

$$U_{\text{PR}} = 2\text{V} + 200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \frac{8\text{V}}{1111.88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 3,44\text{V}$$

Und genau dieser Wert von $3,44\text{V}$ sollte von dem Pyranometer ausgegeben werden, um eine Bestrahlungsstärke von 200W/m^2 zu haben.

Auch hier musste wieder auf die Temperatur geachtet werden, damit die Zelltemperatur nicht 50°C überschreitet. Als die Bestrahlungsstärke korrekt eingestellt war, nahmen wir die

Kennlinie mit dem x-y-Schreiber auf, indem wir den R2-Widerstand bis auf den Wert 00hm verkleinerten.

Aufgenommenen Werte:

Bestrahlungsstärke in W/m^2	U_{C0} in mV	I_{SC} in mA	U_{PG} in V	U_{PR} in V	Z_T in K
200	285	45	3,42	3,44	302
350	455	102	4,51	4,52	305
500	505	177	5,62	5,60	308
600	515	227	6,32	6,33	310
750	525	313	7,41	7,40	301

U_{C0} : Leerlaufspannung

I_{SC} : Kurzschlussstrom

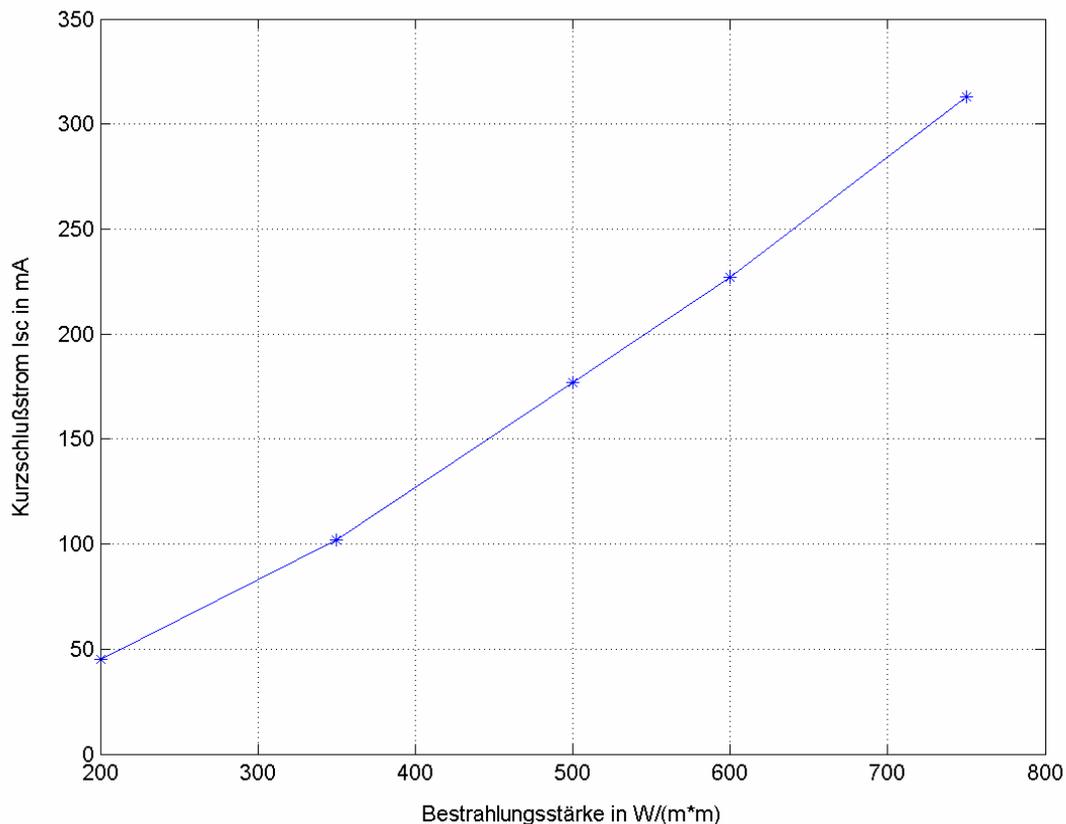
Z_T : Zelltemperatur

U_{PG} : Die gemessene Ausgangsspannung vom Pyranometer

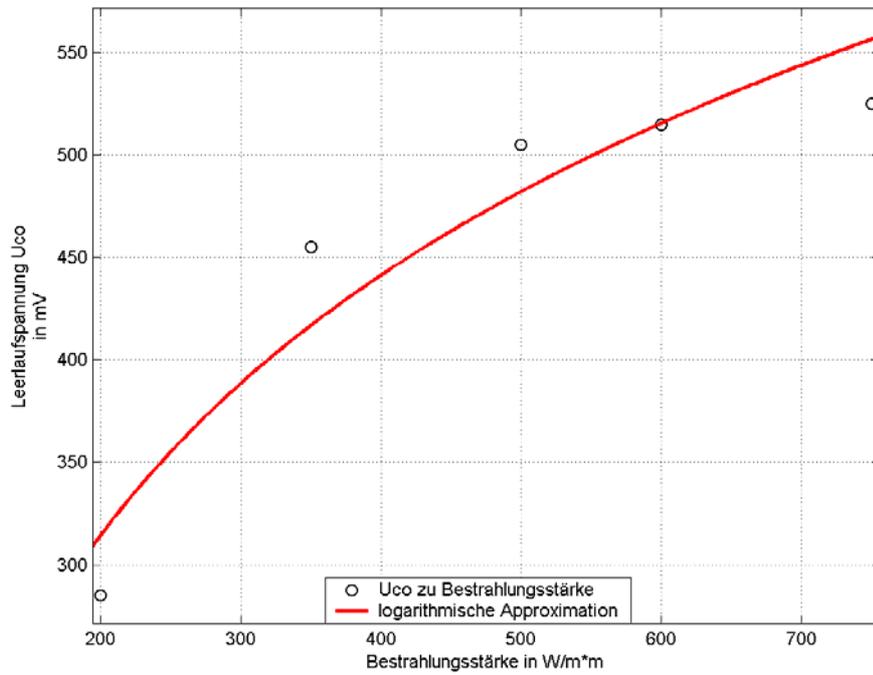
U_{PR} : Die errechnete Ausgangsspannung für Bestrahlungsstärke (siehe Beispiel 1)

2.3.3 Auswertung der Kennlinien

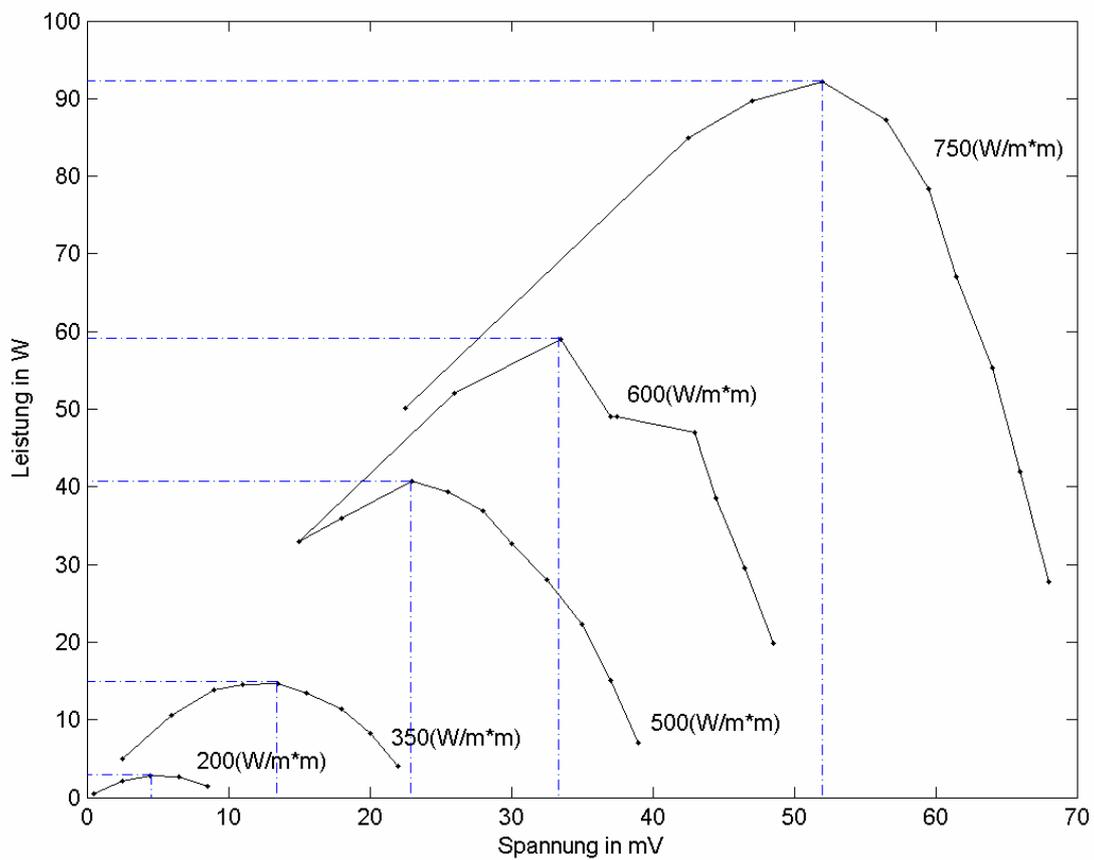
Kennlinie I_{SC} (Bestrahlungsstärke):



Kennlinie U_{co} (Bestrahlungsstärke):



$P(U)$ -Kennlinie:



An dieser P(U) Kennlinien erkennt man ungefähr, wo die maximale Leistung P_{MPP} liegt. Bei diesem Punkt ist der optimale Betriebspunkt P_{MPP} (Strom, Spannung) der Solarzelle. Man kann deutlich aus den Kennlinien erkennen, dass mit zunehmender Bestrahlungsstärke die Leistung der Solarzelle ansteigt.

Ungefähre Abschätzung für P_{MPP} :

Kennlinie bei Bestrahlungsstärke in W/m^2	P_{MPP} in mW
750	92
600	59
500	41
350	15
200	3

Rechnerisch P_{MPP} ermitteln:

Aus der aufgenommenen Solarzellenkennlinie(siehe 2.3.2) werden drei Punkte ausgesucht, die vermutlich nahe bei P_{MPP} liegen. Zu diesen Punkten wird eine Ausgleichsparabel bestimmt und von dieser wird dann die Extremwertstelle gesucht(muss natürlich Maxima sein). Wenn man diese Extremwertstelle ausgerechnet hat, so hat man dann den optimalen Betriebspunkt P_{MPP} (Strom, Spannung).

Beispielrechnung für die Solarzellenkennlinie $750W/m^2$ (siehe Solarzellenkennlinie):

Ausgesuchten drei Werte: Allgemein P(I, U)
 1.Punkt P1(1544mA, 56.5mV)
 2.Punkt P2(1772mA, 52mV)
 3.Punkt P3(1999mA, 42.5mV)

$$I = aU^2 + bU + c$$

Lösung eines linearen Gleichungssystems mit 3 Unbekannten(per Cramersche Regel):

$$\begin{array}{rcl} 1544 & = & a(3192,25) + b(56,5) + c \\ 1772 & = & a(2704) + b(52) + c \\ 1999 & = & a(1806,25) + b(42,5) + c \end{array}$$

$$D = \det | A | = \begin{vmatrix} 3192,25 & 56,5 & 1 \\ 2704 & 52 & 1 \\ 1806,25 & 42,5 & 1 \end{vmatrix} = 3192,25(52 - 42,5) - 56,5(2704 - 1806,25) + (2704 \cdot 42,5) - (52 \cdot 1806,25) = 598,5$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} 1544 & 56,5 & 1 \\ 1772 & 52 & 1 \\ 1999 & 42,5 & 1 \end{vmatrix} = 1544(52 - 42,5) - 56,5(1772 - 1999) + ((1772 \cdot 42,5) - (52 \cdot 1999)) = -1144,5$$

$$a = \frac{D_1}{D} = -1,91228$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} 3192,25 & 1544 & 1 \\ 2704 & 1772 & 1 \\ 1806,25 & 1999 & 1 \end{vmatrix} = 3192,25(1772 - 1999) - 1544(2704 - 1806,25) + ((2704 \cdot 1999) - (1772 \cdot 1806,25)) = 93854,25$$

$$b = \frac{D_2}{D} = \underline{\underline{156,82}} \Rightarrow \underline{\underline{c = -1210,94}}$$

Daraus folgt: $I = (-1,91228)U^2 + (156,82)U - 1210,94$

Da wir den optimalen Punkt für die Leistung suchen, stellen wir die Gleichung auf: $P_{MPP} = U_m \cdot I_m$

Eingesetzt: $P_{MPP} = U \cdot (aU^2 + bU + c)$

$$P_{MPP} = aU^3 + bU^2 + cU$$

Ableitung: $\frac{d}{dU}(P_{MPP}) = 3aU^2 + 2bU + c$

$$0 = U^2 + \frac{2b}{3a}U + \frac{c}{3a} \quad \rightarrow \quad U_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a}$$

Kontrolle, ob Minimum oder Maximum: $\frac{d^2}{dU^2}(P_{MPP}) = 6aU + 2b$

$$\frac{d^2}{dU^2}(P_{MPP}(U_1)) = 2\sqrt{b^2 - 3ac} = 265,67 > 0 \Rightarrow \text{Minimum}$$

$$\frac{d^2}{dU^2}(P_{MPP}(U_2)) = -2\sqrt{b^2 - 3ac} = -265,67 < 0 \Rightarrow \text{Maximum}$$

Also ist die Formel für U_m :
$$U_m = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 3ac}}{-3a}$$

In unserem Beispiel:

$$U_m = \frac{156,82 + \sqrt{(156,82)^2 - (3 \cdot (-1,91228) \cdot (-1210,94))}}{-3 \cdot (-1,91228)} = 50,49 \text{ mV}$$

$$P_{MPP} = a(50,49)^3 + b(50,49)^2 + c(50,49) = 92,50 \text{ mW (Optimalleistung)}$$

$$I_m = \frac{P_{MPP}}{U_m} = 1832 \text{ mA}$$

Hier die weiteren Auswertungen der Kennlinien:

Bestrahlungsstärke in W/m^2	Koeffizienten der Parabel			P_{MPP} in mW	U_m in mV	I_m in mA
	a	b	c			
200	-0,005	-113,55	1147,25	2,90	5,05	577
350	-5,124	34,99	1552,18	14,86	12,58	1184
500	-6,066	203,34	304,245	40,77	23,07	1775
600	-3,15	157,22	41,133	61,26	33,4	1831
750	-1,91228	156,82	-1210,94	92,5	50,49	1832

Wenn wir jetzt die errechneten Werte U_m und P_{MPP} mit den Schätzwerten aus der $P(U)$ – Kennlinie vergleichen, so kann man sehen, dass die geschätzten Werte von den errechneten Werten geringfügig abweichen.

Füllfaktor :

Als nächstes betrachten wir den Füllfaktor. Der Füllfaktor beschreibt das Verhältnis von maximaler Leistung zum Produkt der Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}$$

Bestrahlungsstärke in W/m^2	Füllfaktor
200	0,226
350	0,320
500	0,456
600	0,524
750	0,563

Zellenwirkungsgrad:

Der Zellenwirkungsgrad ist das Verhältnis von maximaler Leistung zur Strahlungsleistung:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{(G_{S\perp} \cdot A_{SZ})}$$

z.B. für 600W/m²: $\eta = \frac{0,061W}{(600W / m^2 \cdot 0,0025m^2)} = 0,041$

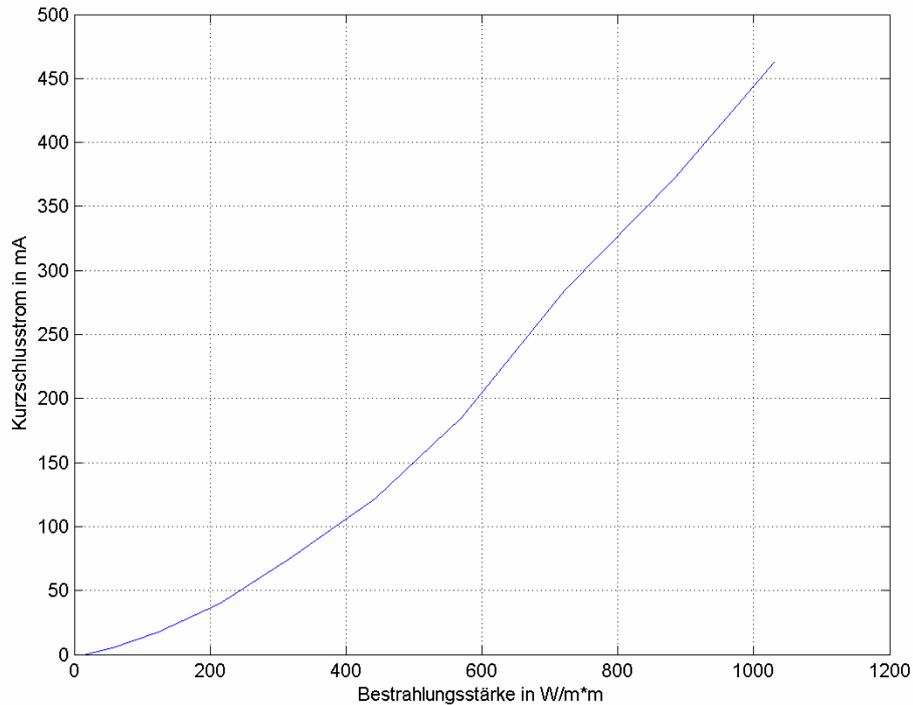
Bestrahlungsstärke in W/m ²	Zellenwirkwiderstand
200	0,0058
350	0,017
500	0,0326
600	0,041
750	0,0493

2.3.4 Solarstrahlungs- und Lichtmessung

Dazu mussten wir die Strahlungsleistung der Lichtquelle regeln und jeweils den Kurzschlussstrom, Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke aufnehmen.

Bestrahlungsstärke in W/m ²	Kurzschlussstrom I _k in mA	Beleuchtung in Lux	Temp. In K
5,55	0	0,1	301
13,9	0	0,5	301
55,6	4,8	26,3	301
123,7	17,3	199	301
214,0	40	734	302
316,88	75	1930	302
443,36	122	3900	302
569,83	185	7340	302
722,72	285	11200	303
883,94	372	16400	305
1031	463	22700	306

Anhand dieser Kennlinie, können wir zu einer bestimmten Bestrahlungsstärke den Kurzschlussstrom bestimmen.



Um die Steigung an der Kennlinie zu bestimmen, muss am besten die Ausgleichsgerade bestimmt werden.

Allgemeine Lösung:

$$y = mx + b$$

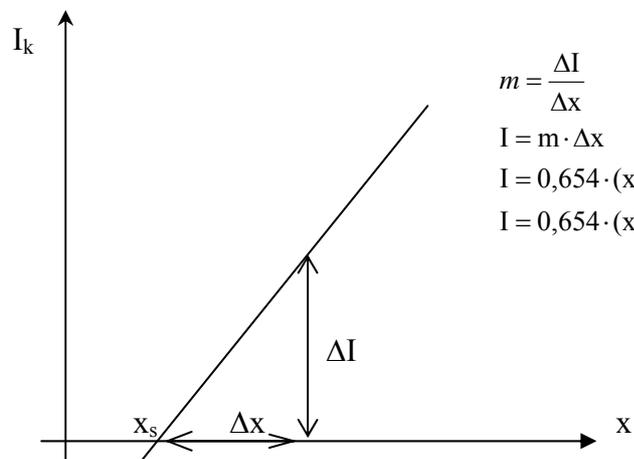
$$185 \text{ mA} = m(569,83 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}) + b$$

$$285 \text{ mA} = m(722,72 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}) + b$$

$$m = 0,654 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \Rightarrow b = -187,66 \text{ mA}$$

$$y = (0,654 \frac{\text{W}}{\text{m}^2})x - 187,66 \text{ mA}$$

→ Die Ausgleichsgerade schneidet die x-Achse (in diesem Fall Bestrahlungsstärke) bei $x_s = 286,9 \text{ W/m}^2$



$$m = \frac{\Delta I}{\Delta x}$$

$$I = m \cdot \Delta x$$

$$I = 0,654 \cdot (x - x_s)$$

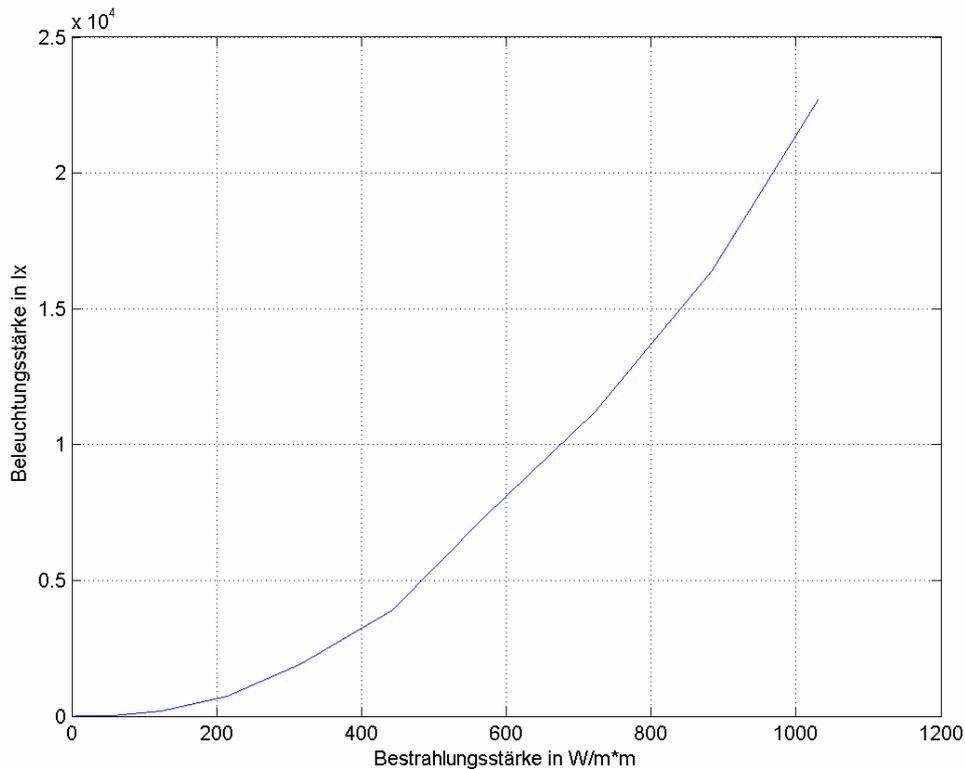
$$I = 0,654 \cdot (x - 286,9)$$

Beispiel: Ich will bei gegebener Bestrahlungsstärke von 600W/m^2 den Kurzschlussstrom ausrechnen.

$$I = 0,654 \frac{\text{mA} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \cdot \left(600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} - 286 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) = 205,36\text{mA}$$

Wenn man das Ergebnis mit der Kennlinie vergleicht, so ist es sehr Näherung.

Die Kennlinie der Beleuchtungsstärke muss auch wieder mit einer Geraden approximiert werden, um rechnerisch auf die Beleuchtungsstärke zu kommen.



Wie man aus der Kennlinie erkennen kann, verläuft sie ungefähr in zwei Abschnitten linear, durch die ich auch zwei Geraden einbeschreiben werde. Die Abschnitte sind von ungefähr 240W/m^2 bis 430W/m^2 und 400W/m^2 und 840W/m^2 .

$$y = mx + b$$

$$1930\text{lx} = \left(116,88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)m + b$$

240W/m^2 bis 430W/m^2 :

$$3900\text{lx} = \left(443,36 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)m + b$$

$$m = 6,034 \frac{\text{lx} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \Rightarrow b = 1224,74\text{lx}$$

$$y = \left(6,034 \frac{\text{lx} \cdot \text{m}^2}{\text{W}}\right) \cdot x + 1224,74\text{lx}$$

$$y = mx + b$$

$$7340lx = \left(569,83 \frac{W}{m^2}\right)m + b$$

$$11200lx = \left(722,72 \frac{W}{m^2}\right)m + b$$

500W/m² bis 840W/m²:

$$m = 25,25 \frac{lx \cdot m^2}{W} \Rightarrow b = -7046lx$$

$$y = \left(25,25 \frac{lx \cdot m^2}{W}\right) \cdot x - 7046lx$$

$$\text{Schnittpunkt : } x_s = 279,05 \frac{W}{m^2}$$

Und wieder benutzen wir den Ansatz:

$$m = \frac{\Delta \text{Lux}}{\Delta x}$$

$$\text{Lux} = m \cdot \Delta x$$

$$\text{Lux} = -25,25 \cdot (x - x_s)$$

$$\text{Lux} = -25,25 \cdot (x - 279,05)$$

Kleine Beispielrechnung:

Welcher Kurzschlussstrom entspricht einer Beleuchtungsstärke von 1000lx?

$$\text{Lux} = 25,25 \frac{lx \cdot m^2}{W} \cdot \left(x - 279,05 \frac{W}{m^2}\right) \Rightarrow x = \frac{1000W}{25,25m^2} + 279,05 \frac{W}{m^2}$$

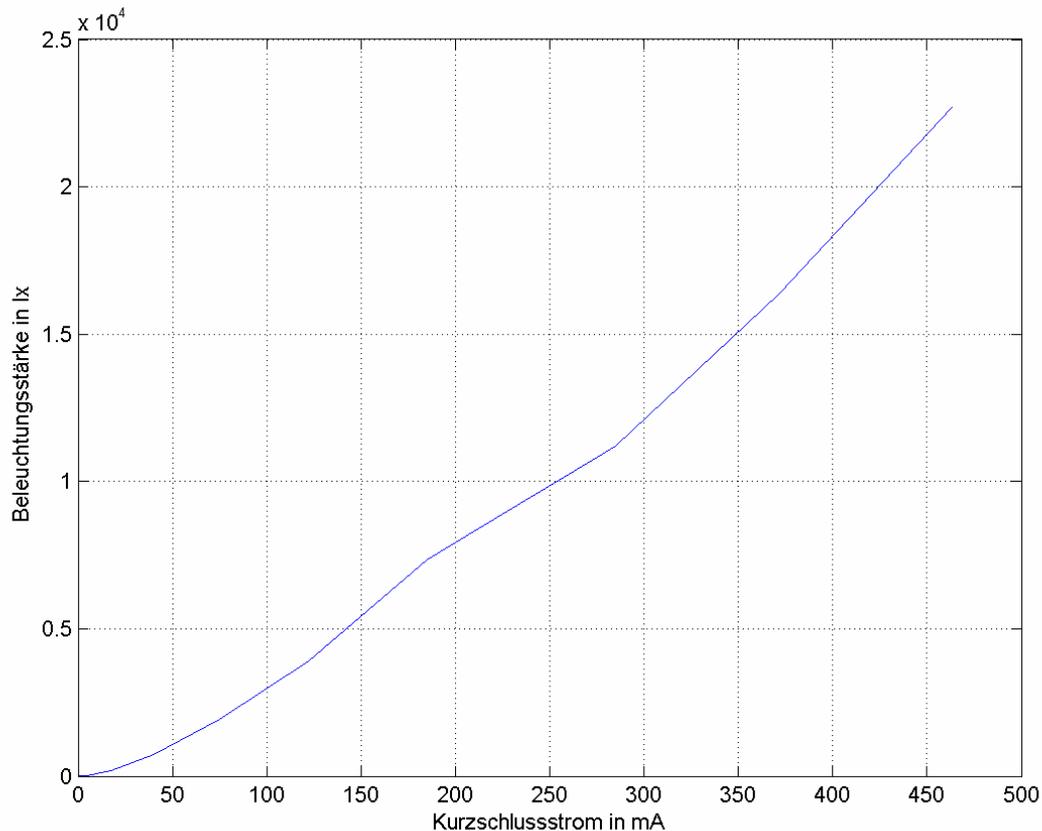
$$x = 318,65 \frac{W}{m^2}$$

$$I_k = 0,654 \frac{mA \cdot m^2}{W} \cdot \left(318,65 \frac{W}{m^2} - 286 \frac{W}{m^2}\right) = 21,35mA$$

Stimmt aber nicht mit den Kennlinie überein!! Da nicht genau approximiert.

+

Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von Kurzschlussstrom:



An der Kennlinie kann man ziemlich deutlich erkennen, dass ab 300mA Kurzschlussstrom sie ziemlich linear verläuft. Um nun die Empfindlichkeit zu berechnen, brauchen wir die Steigung der Kennlinie ab 300mA.

Ich wende wieder die Ausgleichsgerade an und kriege für die Gerade: $y = 69,23x - 9354$

$$m = 69,23 \frac{mA}{lx} \quad \rightarrow \quad E = \frac{1}{69,23 \frac{lx}{mA}} = 0,0144 \frac{mA}{lx}$$

2.3.5 Fehleranalyse

Bei den Versuchsdurchführungen und Berechnungen wurden einige Fehler festgestellt, wie z.B.

1. Bei dem abgedunkelten Kasten konnte noch immer ein kleiner Teil von Strahlen durchdringen und die Messung etwas verfälschen.
2. Die Messgeräte haben Toleranzen.

Gerät	Ablesefehler
Luxmeter	$\pm 0,1lx$
Pyranometer-Spannung	$\pm 0,01V$
Strom der Solarzelle	$\pm 0,1mA$

3. Die Temperatur der Solarzelle konnte nicht konstant gehalten werden.
4. Beim Berechnen der Werte, konnten die Werte nicht zu 100% vom Millimeterpapier abgelesen werden. Strom($\pm 22,27mA$) und bei Spannung($\pm 0,5mV$).