

Untersuchungen zur hochpräzisen Vermessung der elektrischen Parameter von Solarzellen

Dissertation

Zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

Der Universität Konstanz,
Fachbereich für Physik

vorgelegt von Jochen Hohl-Ebinger
Geboren in Heilbronn

Durchgeführt am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

2011

Tag der mündlichen Prüfung: 25.11.2011

1. Referent: Prof. Dr. Gerhard Willeke
2. Referent: Prof. Dr. Paul Leiderer

INHALTSVERZEICHNIS

UNTERSUCHUNGEN ZUR HOCHPRÄZISEN VERMESSUNG DER ELEKTRISCHEN PARAMETER VON SOLARZELLEN	1
1 EINLEITUNG	1
2 GRUNDLAGEN	3
2.1 Emissivität, Plancksche Strahlung und Stefan-Boltzmann-Gesetz	3
2.2 Halbleiter und Solarzellen Grundlagen	4
2.3 Temperaturabhängigkeiten	7
2.4 Nichtlineare Silicium Solarzellen	13
2.5 Neue Solarzellentechnologien	14
3 HOCHPRÄZISE KALIBRIERUNG VON SOLARZELLEN	17
3.1 Kalibriermethoden	17
3.2 Der spektrale Mismatch	19
3.3 Der Anpassungsindex.....	20
3.4 Unsicherheitsrechnung	21
4 MESSUNG DER SPEKTRALEN BESTRAHLUNGSSTÄRKE	25
4.1 Messmethode und Spektralradiometer	25
4.2 Zeitliche Abläufe eines Diodenarrayspektralradiometers / Messung von Blitzspektren	27
4.3 Analyse von Eigenschaften und Messunsicherheiten des eingesetzten Diodenarray-Spektralradiometers	34
4.3.1 Die Reproduzierbarkeit	35
4.3.2 Die Wellenlängengenauigkeit.....	36
4.3.3 Die Spektrale Auflösung.....	37
4.3.4 Die Linearität	38
4.3.5 Thermische Drift	41
4.3.6 Der „Cosine Response“	42
4.3.7 Streulicht	43
4.3.8 Unsicherheit durch Kombinieren der Teilspektren	46
4.3.9 Zusammenfassung der Messunsicherheiten	47

4.3.10	Verbesserungspotential	49
4.4	Bewertung von Einstrahlungsspektren nach IEC 60904-9.....	49
4.5	Messung von Xenonspektren im Bereich der Emissionslinien.....	54
4.6	Zusammenfassung.....	57
5	ANALYSE UND MINIMIERUNG DER UNSICHERHEIT EINER GROßFLÄCHIGEN MESSUNG DER SPEKTRALEN EMPFINDLICHKEIT.....	59
5.1	Einflussfaktoren und Unsicherheiten.....	59
5.1.1	Nichtlineare Solarzellen: Die WLR-Methode.....	59
5.1.2	Der Einfluss der Bandbreite	61
5.1.3	Der Einfluss der Blockung.....	62
5.1.4	Der Einfluss der Inhomogenität.....	63
5.1.5	Monitoreinheit.....	65
5.1.6	Weitere Beiträge und Zusammenfassung.....	66
5.1.7	Einfluss von Solarzellenparametern auf die Messelektronik	68
5.1.8	Verbesserungspotential	70
5.2	Zusammenfassung.....	72
6	ANALYSE UND MINIMIERUNG DER UNSICHERHEIT FÜR DIE RÜCKFÜHRBARE MESSUNG EINER IV-KENNLINIE.....	73
6.1	Übersicht der Einflussfaktoren	73
6.1.1	Messunsicherheit Kurzschlussstrommessung (I_{SC})	73
6.1.2	Messunsicherheit der Spannungsmessung (U_{OC})	75
6.1.3	Unsicherheit der Bestimmung des Punkts maximaler Leistung (P_{MPP}).....	76
6.1.4	Unsicherheit der Füllfaktor-Bestimmung.....	77
6.2	Korrektur der spektralen Fehlanpassung.....	78
6.2.1	Unsicherheit des Spektralkorrekturfaktors	78
6.2.2	Einfluss kleiner Variationen der Intensität.....	83
6.2.3	Wellenlängenabhängige Sensitivitätsanalyse.....	83
6.2.4	Einfluss der Wellenlängenauflösung der Spektralmessung.....	86
6.2.5	Einfluss verbesserter spektraler Verteilungen	87
6.3	Detailanalyse einzelner Faktoren.....	89
6.3.1	Kontaktierung großflächiger Solarzellen	89
6.3.2	Erfassung der Solarzellentemperatur	94
6.4	Weitere Messprozeduren.....	101
6.4.1	Messung von Temperaturabhängigkeiten.....	101
6.4.2	Messprozedur für Einfachsolarzellen mit einem Mehrlichtquellensimulator und Monitorprinzip	105
6.5	Verbesserungspotential.....	108

6.6	Zusammenfassung.....	109
7	REFERENZZELLENTWICKLUNG	111
7.1	Verwendung von Referenzsolarzellen.....	111
7.2	Eignung von Solarzellen als Referenzsolarzellen.....	113
7.3	Auswahl verschiedener Technologien von Solarzellen für WPVS Referenzsolarzellen.....	115
7.4	WPVS Referenzsolarzellen für „neue“ Solarzellentechnologien	118
7.5	Randeffekte bei WPVS Referenzsolarzellen	120
7.5.1	Einflüsse der Verkapselung bei WPVS Referenzsolarzellen.....	120
7.5.2	Einflüsse vom Rand der Referenzsolarzellen	121
7.6	Degradation der Verkapselung von WPVS-Solarzellen.....	122
7.7	Verwendung von Industriesolarzellen als Referenzsolarzellen.....	123
7.8	Verbesserungspotential.....	126
7.9	Zusammenfassung.....	127
8	KALIBRIERUNG SPEZIELLER SOLARZELLEN	129
8.1	Rückseitenkontaktierte Solarzellen.....	129
8.2	Bifaciale Solarzellen.....	133
8.3	Effekte bei serienverschalteten Solarzellen	138
8.4	Zusammenfassung.....	140
9	ZUSAMMENFASSUNG	141
10	ANHANG	143
10.1	Wechsel des Normspektrums AM1.5g	143
10.2	Abkürzungen.....	146
10.3	Symbole.....	147
10.4	Naturkonstanten	148
10.5	Veröffentlichungen.....	149
10.6	Literatur	151

1 Einleitung

Die Energieversorgung der Menschheit stellt eine zunehmend schwierige Aufgabe mit weitreichenden wirtschaftlichen und sozialen Folgen dar. Die fossilen Ressourcen sind begrenzt, ihre Förderung verursacht teilweise immense Schäden für Mensch und Umwelt und die CO₂ Emissionen führen zu einem Treibhauseffekt mit weitreichenden Folgen für das Leben auf der Erde. Die eindrückliche Demonstration der Lagerproblematik für radioaktive Abfälle in Asse lässt auch die kerntechnisch basierte Stromerzeugung nicht als zukunftsorientierte und nachhaltige Lösung erscheinen. Daher müssen CO₂-neutrale Energieträger nutzbar gemacht werden. Unter den erneuerbaren Energien bietet die Sonne das größte Potential [1]. Die Photovoltaik – als direkte Umsetzung von Photonen in elektrischen Strom – hat in den letzten Jahren durch die Unterstützung mit dem Erneuerbare Energiengesetz einen enormen Ausbau und damit auch eine enorme Entwicklung erfahren. Die Jahresweltproduktion lag 2009 bei 7.2 GW und wird für 2014 auf 29 GWp geschätzt [2], wobei aktuelle Zahlen der Bundesnetzagentur bereits am 31.10.2010 eine installierte Leistung von > 15 GWp allein in Deutschland mit einem geschätzten Zubau von > 7 GWp allein in 2010 melden.

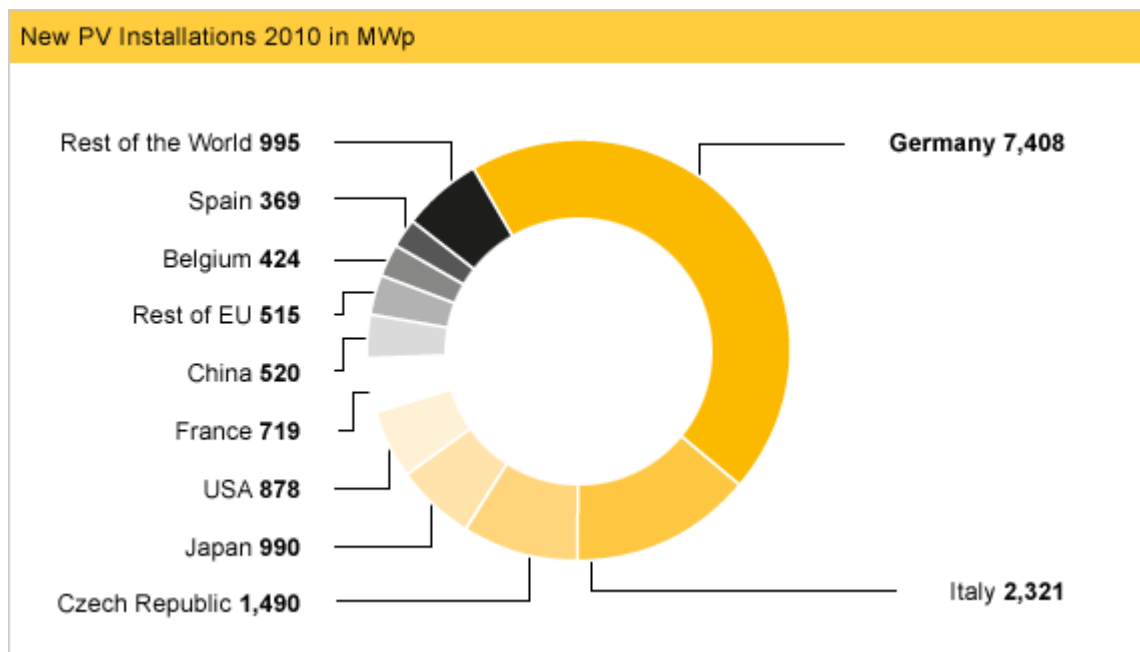


Abbildung 1.1: Die in 2010 installierten Leistungen von Photovoltaikanlagen [3].

Fabriken mit einem Jahresausstoß von 1 GWp sind keine Seltenheit mehr. Die Bestimmung der Leistungsfähigkeit von photovoltaischen Bauelementen und damit ganzer Jahresproduktionen unterliegt derzeit Messunsicherheiten von $\geq 2\%$. Unter der Annahme eines Preises von 2 €/Wp ergibt sich hiermit für die erwarteten Produktionsvolumina in 2014 eine Unsicherheit von 1100-1700 Mio€/a.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit den Ursachen und der Minimierung dieser Messunsicherheiten. Die Hauptquelle für Messunsicherheiten liegt in den radiometrischen Messgrößen. Das Zusammenspiel der unterschiedlichen Solarzellentypen mit der Messtechnik muss sowohl bzgl. der optischen als auch elektrischen Größen berücksichtigt werden. Dabei stellt die Kalibrierung von unverkapselten Solarzellen zusätzliche Anforderungen an die elektrische und thermische Kontaktierung. Die Abschätzungen von Heidler und Beier [4] stellen bisher die Grundlage für Messunsicherheiten am Fraunhofer ISE CalLab dar. Die Aufgabe dieser Arbeit bestand darin die Bestimmung der Messunsicherheiten wesentlich zu präzisieren, an die aktuellen Anforderungen anzupassen und Verbesserungspotential zu erarbeiten.

In Kapitel 2 werden die relevanten Grundlagen über Solarzellen zusammengefasst. Kapitel 3 gibt einen Überblick über verschiedene Kalibriermethoden und erläutert zwei Kenngrößen zur spektralen Anpassung. Der spektrale Mismatch, welcher als Korrekturfaktor dient wird durch den in dieser Arbeit

entwickelten Anpassungsindex ergänzt. Dieser ermöglicht eine bessere Auswahl hinsichtlich spektraler Anpassung von Referenz- und Testzelle und wird in den späteren Kapiteln Anwendung angewendet und validiert.

Die Standard-Test-Bedingungen für Solarzellen enthalten sowohl die Bestrahlungsstärke mit 1000 W/m^2 als auch die spektrale Verteilung mit AM1.5g als Bezugspunkt für Kalibrierungen. Die genaue Bestimmung dieser Größen erfordert radiometrische Messungen höchster Genauigkeit. Kapitel 4 fasst die Detailuntersuchungen zur Ermittlung der spektralen Bestrahlungsstärke zusammen. Die Untersuchungen erlauben ein tieferes Verständnis der Messungen und ermöglichen Verbesserungen der Messung der spektralen Bestrahlungsstärkeverteilung von Sonnensimulatoren. Vor allem die Einflüsse auf die Messung von spektralen Verteilungen bei Blitzlichtsonnensimulatoren, wie sie in der industriellen Produktion und bei Modulmessung verwendet werden, wurden eingehend untersucht.

Zur Korrektur der Messung auf die standardisierte spektrale Bestrahlungsstärke AM1.5g ist die genaue Kenntnis der spektralen Eigenschaften des Messobjektes notwendig. In Kapitel 5 sind die Detailuntersuchung und Methoden für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeitsmessung an Solarzellen zusammengestellt. Vor allem die Messung von 6" Solarzellen, die derzeit als industriellen Standard angesehen werden können, stand im Mittelpunkt der Arbeiten. Da ein differentielles Messverfahren eingesetzt wird, muss die Abweichung vom linearen Verhalten der spektralen Empfindlichkeit bzw. des Kurzschlussstromes berücksichtigt werden. Dazu wurde eine Methode für Kalibrierungen entwickelt, welche sich direkt am Messplatz zur Messung der spektralen Empfindlichkeit implementieren lässt. Diese verwendet ein breitbandiges sonnenähnliches Spektrum.

Die Leistung der Solarzellen wird aus der auf die Standard Test Bedingung bezogene Kennlinienmessung ermittelt. Kapitel 6 fasst die Messunsicherheiten für die Messung der IV-Kennlinienparameter in Abschnitt 6.1 zusammen. Eine Detailanalyse und die dazu entwickelten Methoden sind in den Abschnitten 6.2 bis 6.4 dargestellt. Vor allem die spektralen Einflüsse auf die Messung sind hierbei eingehend untersucht. Auf der Basis dieser Untersuchungen konnte z.B. die bisher angegebene Unsicherheit der spektralen Fehlanpassung von 0.54% auf 0.2% präzisiert werden.

Wesentlicher Bestandteil jeder Kalibrierung sind Transfernormale. Für den Übertrag der von der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) auf SI-Einheiten rückgeführten absoluten Bestrahlungsstärke, als auch zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit werden Referenzsolarzellen eingesetzt. In Kapitel 7 ist die Charakterisierung der Referenzsolarzellen und der für Referenzen notwendigen Eigenschaften dargestellt. Auch die Entwicklung eines Designs für große Referenzsolarzellen ist Teil dieses Kapitels.

Detailuntersuchungen zu Solarzellen mit besonderen Eigenschaften sind in Kapitel 8 zusammengefasst.

Alle Kapitel schließen mit einer Zusammenfassung des noch vorhandenen Verbesserungspotentials. Dies ermöglicht über die bisher eingeführten Verbesserungen hinaus, auch in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Messunsicherheiten zu leisten.

2 Grundlagen

Die Zusammenstellung der Grundlagen basiert im Wesentlichen auf Halbleiterphysik- und Solarzellenphysikliteratur [5-10]. Auf die Temperaturabhängigkeit der Solarzellenparameter, vor allem der offenen Klemmenspannung, wird näher eingegangen um die Grundlagen zu Abschnitt 6.4.1 zu schaffen. Eine kurze Zusammenstellung erläutert die Ursachen für nichtlineare Eigenschaften von Solarzellen. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung von Solarzellenkonzepten mit vollständiger Rückseitenkontaktierung.

2.1 Emissivität, Plancksche Strahlung und Stefan-Boltzmann-Gesetz

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt strahlt elektromagnetische Wellen ab. Nach Planck kann die Strahlungsverteilung für einen schwarzen Körper wie folgt berechnet werden:

$$E(\nu, T) = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad (2.1)$$

Ein schwarzer Körper absorbiert die auf ihn auftreffende Strahlung vollständig. Für einen idealen schwarzen Körper (Strahler) ist diese Eigenschaft unabhängig von der Richtung der Ausstrahlung (diffus) und man hat damit auch einen Lambert'schen Strahler. Wird nur ein Teil der Strahlung absorbiert und ist dieser Anteil unabhängig von der Wellenlänge so spricht man von einem grauen Strahler mit einem Absorptionsgrad < 1 . Nach Kirchhoff ist im thermischen Gleichgewicht der Absorptionsgrad α und der Emissionsgrad ε (Emissivität) identisch.

Da im Allgemeinen für die Absorption (A') und die Reflektion (R') für einen opaken Körper gilt:

$$A' + R' = 1 \text{ folgt für die Emissivität } (\varepsilon): \varepsilon = 1 - R .$$

Für radiometrische Messungen der Temperatur spielt die Emissivität der zu messenden Oberfläche eine entscheidende Rolle. Nach Stefan und Boltzmann ist die Strahlungsleistung (P) eines schwarzen Körpers proportional zur vierten Potenz der Temperatur (T):

$$P = \sigma AT^4 \quad (2.2)$$

mit

σ : Stefan-Boltzmann Konstante

A : Fläche des Körpers

2.2 Halbleiter und Solarzellen Grundlagen

Die Leistung einer Solarzelle wird aus ihrer IU-Kennlinie bestimmt. Die IV-Kennlinie einer Halbleitersolarzelle mit einem pn-Übergang lässt sich mit dem erweiterten 2-Diodenmodell beschreiben:

$$I(U) = I_{01} \exp\left(q \frac{U - IR_S}{n_1 kT}\right) + I_{02} \exp\left(q \frac{U - IR_S}{n_2 kT}\right) - \frac{U - IR_S}{R_p} - I_{ph} \quad (2.3)$$

Sie stellt eine Erweiterung der Shockley-Gleichung dar. Eine Diode wird mit einem exponentiellen Verlauf beschrieben. Eine weitere Diode zur Beschreibung der Raumladungszone hinzugefügt. Die Idealitätsfaktoren haben im betrachteten Idealfall die Werte $n_1=1$ und $n_2=2$. Im Shockley-Modell wird von einem abrupten pn-Übergang mit ebenso abrupten Grenzen der Raumladungszone ausgegangen. Der Diodensättigungsstrom I_{01} wird durch die Dotierungen (N_D und N_A), die Diffusionslängen (L_n und L_p), die Diffusionskonstanten (D_n und D_p) und die intrinsische Ladungsträgerdichte n_i von Basis und Emitter beschrieben:

$$I_{01} = q \left(\frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} \right). \quad (2.4)$$

In einer realen Solarzelle müssen die Einflüsse der Oberflächen des endlich ausgedehnten Halbleiters berücksichtigt werden [6, 9]. Dies führt zu einem sogenannten Geometriefaktor, welcher die Rekombination an den Oberflächen mittels einer Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit beschreibt.

I_{02} beschreibt Verluste in der Raumladungszone. Für hohe Spannungen dominiert der I_{01} die Verluste und die Offenenklemmenspannung kann daher vereinfacht beschrieben werden:

$$U_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{01}} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Des Weiteren treten in der Solarzelle signifikante Serienwiderstände (R_S) auf, welche durch die Halbleiterschichten und die Kontaktmetallisierung verursacht werden. Parallelwiderstände sind ebenfalls charakteristisch für Solarzellen, daher wird das Model von Shockley um den R_p zu Gleichung (2.3) erweitert.

Die auf die Solarzelle einstrahlenden Photonen werden mit dem Reflektionsgrad $R(\lambda)$ reflektiert. Die verbleibenden Photonen werden mit dem Absorptionsgrad α absorbiert und generieren Elektronen-Loch Paare mit der Generationsrate G . Diese rekombinieren mit der Rekombinationsrate U . Bei der Rekombination wird die Energie in Form von Photonen, Phononen oder an andere Ladungsträger abgegeben. Der erste Prozess ist lediglich die Umkehrung der Absorption und wird strahlende Rekombination genannt. Bei indirekten Halbleitern wie Silicium, ist für die Impulserhaltung ein zusätzliches Phonon notwendig. Dies führt zu einer stark reduzierten strahlenden Rekombination im Vergleich zu direkten Halbleitern. Für Siliciumsolarzellen ist vor allem die Abgabe der Energie an einen anderen Ladungsträger im Leitungsband (Auger Rekombination) und die Rekombination über Störstellen wichtig. Die Auger-Rekombination nimmt mit der Dotierung zu und dominiert in Silicium oberhalb 10^{17} cm^{-3} [10]:

$$U_{Auger,n} = C_n n^2 p \quad (2.6)$$

(für Löcher entsprechend).

2 Grundlagen

Die Überschussenergie des Elektrons wird in Form von Phononen an das Kristallgitter abgegeben (Thermalisierung). Die Störstellenrekombination wird durch Verunreinigungen im Halbleiter mit Energiezuständen in der Bandlücke verursacht. Dieser Rekombinationsmechanismus ist als Shockley-Read-Hall Rekombination bekannt und mit den charakteristischen Lebensdauern τ_n und τ_p ergibt sich die Rekombinationsrate für Elektronen unter Niedriginjektionsbedingungen zu:

$$U_{\text{SRH}} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.7)$$

Die Ladungsträgerdichte für Elektronen:

$$n_1 = N_C \exp\left(\frac{E_t - E_C}{k_B T}\right), \quad (2.8)$$

hängt von den Energien der Trapniveaus E_t ab (für Löcher im Valenzband entsprechend).

An Oberflächen treten aufgrund nicht abgesättigter Bindungen („dangling bonds“) Zustände innerhalb der Bandlücke auf. Die Auswirkung dieser Zustandsdichten wird mit Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten beschrieben. Daraus folgt für die Rekombinationsrate [10]:

$$U_S = \frac{S_n S_p np - n_i^2}{S_n(n + n_1) + S_p(p + p_1)} \quad (2.9)$$

Diese Gleichung wird für eine kontinuierliche Defektzustandsdichte an der Oberfläche nach [11] erweitert zu:

$$U_S = (n_S p_S - n^2) \nu_{\text{th}} \int_{E_V}^{E_C} \frac{D_{\text{it}}(E_t)}{(n_S + n_1)/\sigma_p(E_t) + (p_S + p_1)/\sigma_n(E_t)} dE_t \quad (2.10)$$

Mit den Einfangquerschnitten σ_p , σ_n für Elektronen und Löcher und der Zustandsdichte $D_{\text{it}}(E_t)$.

Die Einstrahlung mit dem Photonenfluss $\Gamma(\lambda)$ und die Absorption im Halbleiter $\alpha(\lambda)$ führen zu generierten Ladungsträger mit der Generationsrate $G(\lambda)$. Diese rekombinieren mit der Rekombinationsrate U und führen so zu einer Änderung der Ladungsträgerdichten:

$$\frac{dn}{dt} = G(x) - U(x) = \alpha(\lambda)\Gamma(\lambda) - (n - n_0)/\tau \quad (2.11)$$

Die so generierten Ladungsträger führen zu einem Dichtegradienten, welcher einen Diffusionsstrom treibt. Dieser Diffusionsstrom wird mit der Diffusionskonstante $D_{n,p}$ für Elektronen bzw Löcher wir folgt beschrieben:

$$j^{\text{diff}} = j_n^{\text{diff}} + j_p^{\text{diff}} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} + D_p \frac{dp}{dx} \right) \quad (2.12)$$

Durch die räumliche Trennung der Ladungsträger entsteht ein elektrisches Feld mit der Feldstärke E . Dieses erzeugt einen Feldstrom:

$$j^{\text{feld}} = qE(\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.13)$$

Nach der Einsteingleichung ist die Diffusionskonstante mit der Mobilität wie folgt verknüpft:

$$D_{n,p} = \frac{k_B T}{q} \mu_{n,p} \quad (2.14)$$

Außerhalb des pn-Übergangs - in der quasineutralen Zone - ist die Diffusion der Transportprozess für die Ladungsträger. Zusammen mit der Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dn}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (2.15)$$

ergibt sich eine Lösung der obigen Transportgleichungen für den Strom aus dem p-dotierten Bereich unter der Annahme von Rekombination an der Solarzellenrückseite und der Generation (Photonenfluss $F(\lambda)$):

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) F(\lambda) (1 - R(\lambda)) \exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (2.16)$$

nach [5] zu:

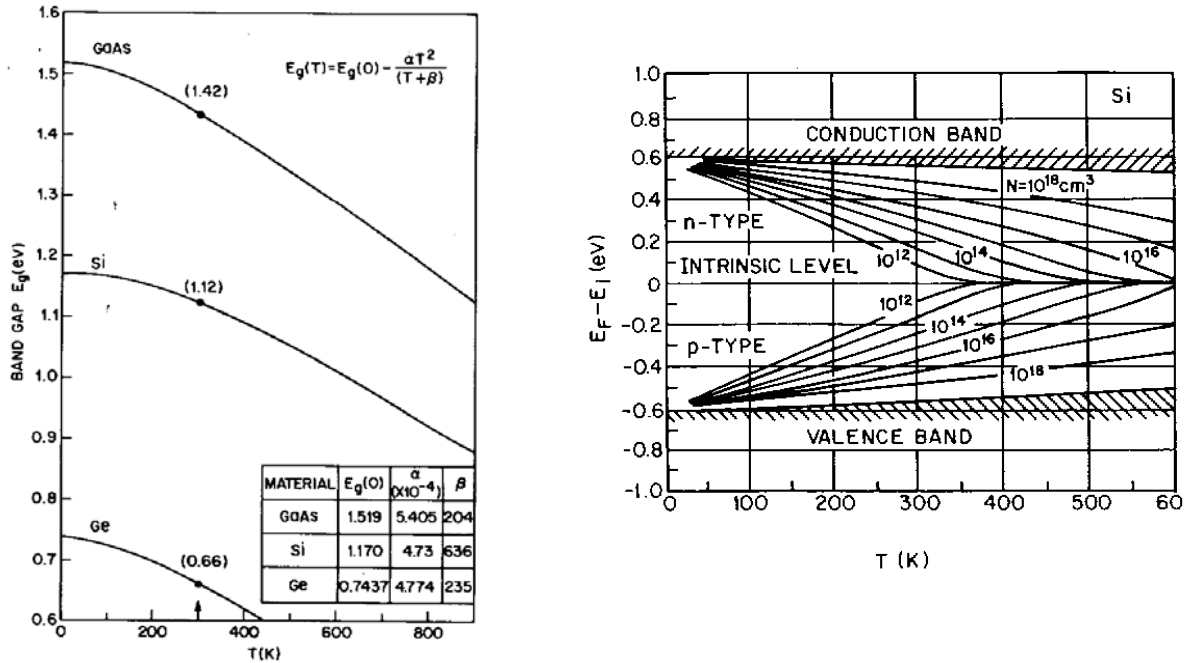
$$j_{\text{Ph}} = \frac{q(1-R)\alpha L_n F(\lambda)}{(\alpha L_n)^2 - 1} \exp[-\alpha(x+W)] \cdot \left\{ \frac{(SL_n/D_n)[\cosh(y/L_n) - \exp(-\alpha y)] + \sinh(y/L_n) + \alpha L_n \exp(-\alpha y)}{(SL_n/D_n)\sinh(y/L_n) + \cosh(y/L_n)} \right\} \quad (2.17)$$

Mit der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S an der Solarzellenrückseite und der Diffusionslänge:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau} \quad (2.18)$$

2.3 Temperaturabhängigkeiten

Bei den Temperaturabhängigkeiten für Halbleiter ist die Temperaturabhängigkeit der Bandlücke von Bedeutung. Aufgrund der zunehmenden Zahl der Phononen vergrößern sich auch die Gitterabstände. Dies führt auch zu einer Verschiebung der Energieniveaus und damit der Bandlücke.



a) Temperaturabhängigkeit der Bandlücke für verschiedene Halbleiter. In b) ist zu erkennen, dass die Fermienergien von p- und n-Halbleiter mit zunehmender Temperatur und geringerer Dotierung zusammenrücken. Des Weiteren ist die Reduzierung der Bandlücke mit zunehmender Temperatur zu erkennen. Aus [5].

Die offene Klemmenspannung am pn-Übergang sinkt bei Lichteinstrahlung mit zunehmender Temperatur aufgrund der Reduzierung der Bandlücke (vgl. Abbildung 2.2 a)). Im Bereich der Betriebstemperatur von Solarzellen (-10°C - 75°C bzw. 263 - 348 K) kann die Temperaturabhängigkeit der Bandlücke näherungsweise als linear angenommen werden [7]:

$$E_g(T) = 1.206 - 0.000273 T \text{ eV} \tag{2.19}$$

Nach Varshni [12] gilt:

$$E_g = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \tag{2.20}$$

Die Reduzierung der Bandlücke bewirkt auch eine steigende Absorption im langwelligen (vgl. Abbildung 2.3).

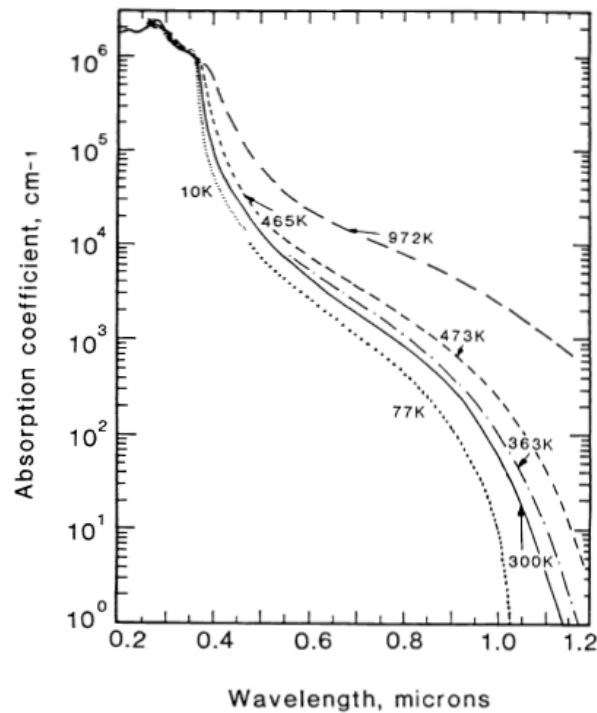


Abbildung 2.3: Absorptionskoeffizient von Silicium für verschiedene Temperaturen. Aus [13].

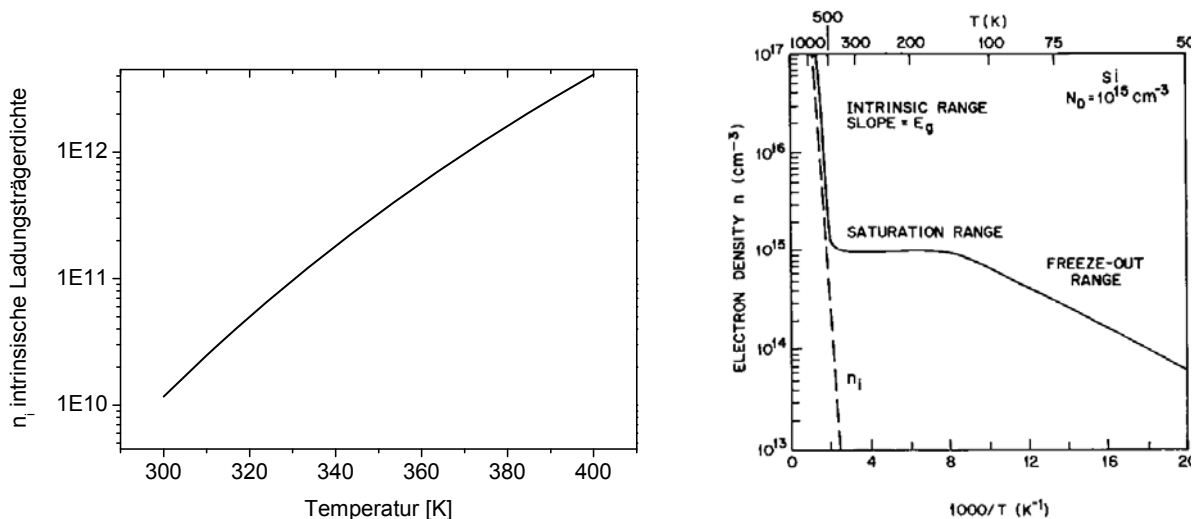
Aus Gleichung (2.5) ist zu erkennen, dass für die Temperaturabhängigkeit der Spannung, welche sich über dem pn-Übergang ausbildet, die Abhängigkeit des Diodensättigungsstromes I_{01} betrachtet werden muss. Der Einfluss der intrinsischen Ladungsträgerdichte, der Diffusionskonstante und der Diffusionslänge in Gleichung (2.4) sind hierbei relevant. Für eine reale Solarzelle muss in Gleichung (2.4) noch die Rekombination an Oberflächen berücksichtigt werden. Nach [14] kann bei niedriger p-Dotierung der Basis mit der Dicke W_b und der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S der Rückseite der Diodensättigungsstrom der Basis wie folgt beschrieben werden:

$$J_{0b} = qn_i^2 \frac{D_n}{N_A L_n} \left(\frac{SL_n/D_n \cosh(W_b/L_n) + \sinh(W_b/L_n)}{SL_n/D_n \sinh(W_b/L_n) + \cosh(W_b/L_n)} \right) \quad (2.21)$$

Dabei ist $W_{p,n}$ die Ausdehnung des p- bzw n-Gebietes und Gleichung (2.4) erweitert sich zu:

$$I_{01} = q \left(\frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} F_p + \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} F_n \right) \quad (2.22)$$

2 Grundlagen



a)

b)

Abbildung 2.4: a) Temperaturabhängigkeit der intrinsischen Ladungsträgerdichte für einen Silicium Halbleiter mit einer Dotierung von $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ und b) der Elektronendichte für n-dotiertes Silicium (10^{15} cm^{-3} Phosphor). Für p-Typ ähnliches Verhalten. Aus [5].

Die intrinsische Ladungsträgerdichte nimmt mit der Temperatur zu (vgl. Abbildung 2.4 a)) und kann nach [15, 16] wie folgt berechnet werden:

$$n_{i,\text{eff}}(T, N_A) = 0.9688 \times 1.64 \times 10^{15} \times \left(\frac{T}{1\text{K}} \right)^{1.706} \times \exp \left\{ - \frac{E_{g,0}(T) - \Delta E_g(T, N_A)}{2k_B T} \right\} \quad (2.23)$$

Hierbei wird durch $\Delta E_g(T, N_A)$ das „Band-Gap-Narrowing“ berücksichtigt.

Die Ladungsträgerdichten spielen aufgrund der Dotierung im relevanten Temperaturbereich eine untergeordnete Rolle (Abbildung 2.4 b)).

Die Temperaturabhängigkeit der Lebensdauer ist im relevanten Bereich für tiefe Störstellen vernachlässigbar (vgl. Abbildung 2.5).

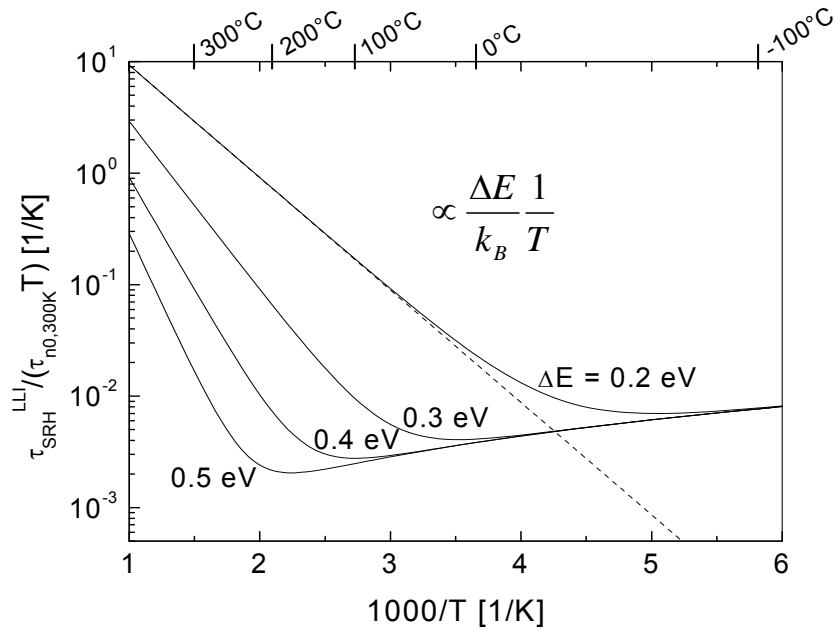


Abbildung 2.5: Temperaturabhängigkeit der Shockley-Read-Hall Lebensdauer bei Niedriginjektion (τ_{SRH}^{LLI}) für verschiedene Defektniveaus. Mit $\Delta E = E_C - E_t$. Aus [17].

Die Mobilität der Ladungsträger ist durch die Streuung an Phononen begrenzt und nimmt mit der Temperatur ab. Mit zunehmender Dotierung verschwindet diese Temperaturabhängigkeit [18].

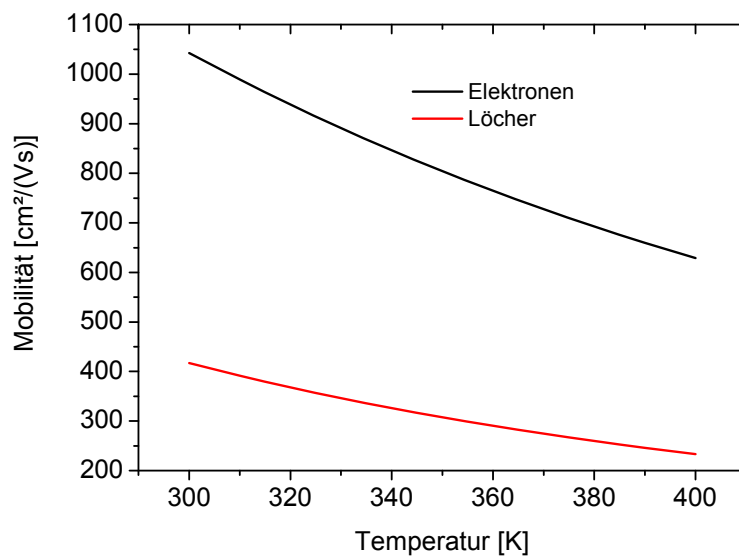


Abbildung 2.6: Temperaturabhängigkeit der Mobilität von Elektronen und Löchern in einem Silicium Halbleiter.

Die Temperaturabhängigkeit des Diodensättigungsstromes und damit der Spannung einer Solarzelle ist also im Wesentlichen von der Änderung der intrinsischen Ladungsträgerdichte (s. Abbildung 2.4), der Änderung der Bandkante (s. Gleichung (2.19) und Abbildung 2.2) beeinflusst.

2 Grundlagen

Die Temperaturabhängigkeit der offenen Klemmenspannung kann aus Gleichung (2.5) durch Ableiten berechnet werden. Nach [19] (Anhang Gl. 7.12) ergibt sich dies zu:

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = \frac{k_B}{q} \ln J_{SC} - \frac{k_B}{q} \ln B - \left(\frac{k_B}{q} \ln T + \frac{V_T}{T} \right) \left(3 + \frac{\gamma}{2} \right) + \frac{V_T}{J_{SC}} \frac{dJ_{SC}}{dT} + \frac{dV_g}{dT} \quad (2.24)$$

Mit der Varshni-Beziehung:

$$\frac{dV_g}{dT} = \frac{\alpha T(T + 2\beta)}{q(T + \beta)^2} \quad (2.25)$$

Die dimensionslose Konstante B im zweiten Term in Gl. (2.24) muss so gewählt werden, dass

$$J_0 = BT^{(3+\gamma/2)} \text{Exp} \left(-\frac{E_g(T)}{k_B T} \right) \quad (2.26)$$

erfüllt ist. Die Temperaturabhängigkeit der Diffusionskonstante und der Minoritätsladungsträgerlebensdauer (D_n/τ) wird mit T^γ modelliert, ist jedoch so gering, dass $\gamma=0$ gesetzt werden kann.

Mit dem in Tabelle 2.1 a) beschriebenen Parametersatz wurden die einzelnen Terme von Gleichung (2.24) des Temperaturkoeffizienten der offenen Klemmenspannung einer Siliciumsolarzelle bestimmt (s. Tabelle 2.1 b)):

T=	300 K
k_B =	8.62E-05 eV/K
q=	1.60E-19 C
J_{SC} =	35 mA/cm ²
dJ_{SC}/dT =	0.05 %/K
dJ_{SC}/dT =	0.0175 mA/cm ² /K
γ =	0
B=	2
V_t =	1.61E+17 eV/C
E_{g0} =	1.16 eV
V_{g0} =	7.21E+18 eV/C
α =	7.02E-04 eV/K
β =	1108 K
J_0 =	2.13E-12 A/cm ²
V_{OC} =	608.1 mV

a)

	1. Term	-0.306 mV/K
	2. Term	-0.060 mV/K
ni^2	3. Term	-1.733 mV/K
	4. Term	0.013 mV/K
Bandlücke	5. Term	-0.267 mV/K
	$Tk(V_{OC})$	-2.354 mV/K

b)

Tabelle 2.1: Berechnung des Temperaturkoeffizienten der offenen Klemmenspannung nach Gleichung (2.24). a) enthält die eingesetzten Parameter typisch für eine Silicium Industriesolarzelle. b) zeigt die Beiträge der einzelnen Terme der Gleichung.

Des Weiteren kann direkt aus den Gleichungen (2.22) und (2.5) oder auch mittels PC1D für unterschiedliche Material- und Solarzellenparameter der Temperaturkoeffizient von U_{OC} bestimmt werden.

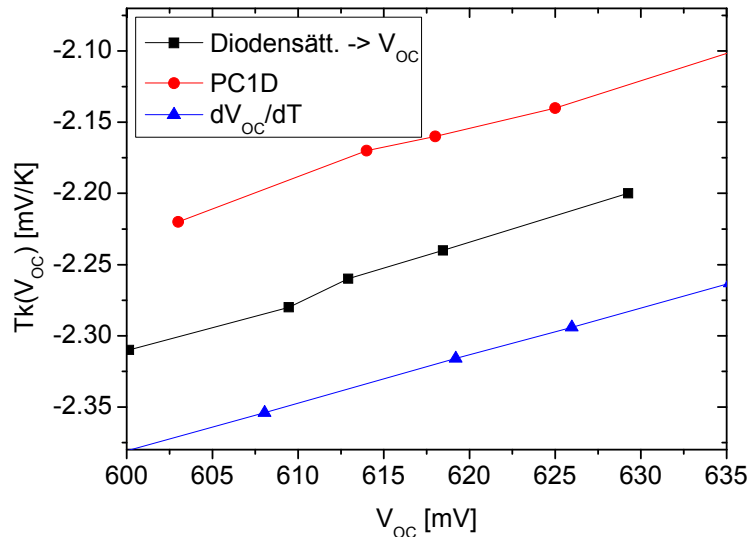


Abbildung 2.7: Temperaturkoeffizienten der offenen Klemmenspannung berechnet aus dem Diodensättigungsstrom, mittels PC1D und aus Gleichung (2.24).

Durch Variation der Parameter bei der analytischen Berechnung des Temperaturkoeffizienten kann gezeigt werden, welchen Beitrag die unterschiedlichen Größen zum gesamten Temperaturkoeffizienten haben. Dabei zeigt sich folgende Reihenfolge:

	Ursache	Abhängigkeit
1.	Zustandsdichten	$T^{1.706}$
2.	Fermiverteilung	$\text{Exp}(-1/T)$
3.	Bandlücke	T
4.	Mobilität	$-T^{-1/2}$

Tabelle 2.2: Temperaturabhängigkeiten der offenen Klemmenspannung einer Solarzelle

Somit lässt sich eine Veränderung des Temperaturkoeffizienten in der Modellrechnung vorwiegend auf eine Änderung des Temperaturmodells der intrinsischen Ladungsträgerdichte [16, 20] zurückführen.

Die Temperaturabhängigkeit des Stromes resultiert im Wesentlichen aus der Tatsache, dass die Bandlücke (vgl. Abbildung 2.2) und damit die Absorption (Abbildung 2.3) sich mit der Temperatur verändern. Dies betrifft vor allem die Absorption im langwelligen Spektralbereich. Dabei kommt die Wirkung der rückseitigen Passivierung und des durch Höherdotierung erzeugten „Back-Surface-Fields (BSF)“ zum Tragen. Ladungsträger, welche durch langwellige Photonen erzeugt wurden, generieren aufgrund der geringeren Absorptionswahrscheinlichkeit Überschussladungsträger auch in der Nähe der Solarzellennrückseite. Bei Industriesolarzellen wird durch Einlegieren der Aluminiumkontaktmetallisierung ein Aluminium-BSF erzeugt. Die Wirkung dieses Al-BSF hängt stark von der Grunddotierung der Basis ab und steigt leicht mit der Temperatur aufgrund der zunehmenden Ionisierung der Aluminiumatome [21].

In [22, 23] sind ausgehend vom 2-Diodenmodell Betrachtungen der Temperatur- und Einstrahlungsabhängigkeit beschrieben.

2.4 Nichtlineare Silicium Solarzellen

Nach Gleichung (2.17) ist der Zusammenhang zwischen Photonenfluss und Kurzschlussstrom der Solarzelle proportional. Jedoch können Abweichungen von der Linearität in Silicium aufgrund injektionsabhängiger SRH (Shockley-Read-Hall) Rekombinationsprozesse auftreten. Für hohe Injektionsdichten kann auch der Wechsel von SRH dominierten Rekombinationsprozessen zur Auger Rekombination zu einem nicht-linearen Zusammenhang zwischen Einstrahlung und Strom führen. Für Standard p-Typ Solarzellen (ca. 2-5 Ωcm) treten solche Effekte i.A. oberhalb der Intensität von einer Sonne (1000 W/m^2) auf, abhängig vom Material auch bei multikristallinen oder auch für n-Typ Solarzellen schon bei niedrigeren Intensitäten. Hocheffizienzsolarzellen mit SiO_2 Rückseiten-Passivierung zeigen ebenfalls nicht-lineare Eigenschaften [24]. Die Asymmetrie der Einfangsquerschnitte von Elektronen und Löcher führt in Gleichung (2.10) dazu, dass die Terme im Nenner bei jeweils unterschiedlich hoher Injektion dominieren.

Abbildung 2.8 zeigt die differentiellen spektralen Empfindlichkeiten (s. Abschnitt 3.1), bei unterschiedlicher Biasbestrahlung (Injektionsniveau 0-1000 W/m^2). Die starken Unterschiede sind auf den Wechsel des Rekombinationspfades in multi-kristallinen Material mit hoher Defektdichte zurückzuführen.

In Abschnitt 5.1.1 wird eine Methode zur Berücksichtigung dieser Nichtlinearität bei der Messung der spektralen Empfindlichkeit mittels einer differentiellen Messmethode erläutert.

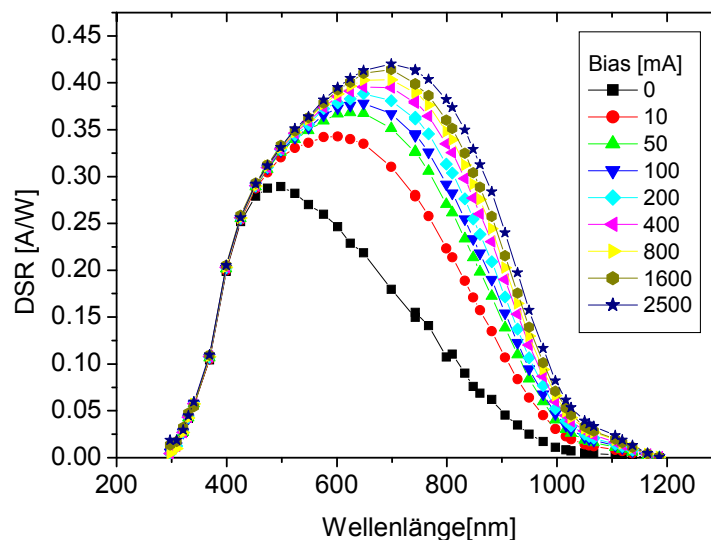


Abbildung 2.8: Differentielle spektrale Empfindlichkeit einer Silicium Solarzelle auf defektreichem multi-kristallinem Material.

2.5 Neue Solarzellentechnologien

Zur Steigerung der Wirkungsgrade und Senkung der Herstellungskosten werden neue Solarzellenkonzepte entwickelt. Im Bereich der waferbasierten Silicium Solarzellen sind dabei drei Konzepte mit rückseitiger elektrischer Kontaktierung für beide elektrischen Kontakte zu nennen. Alle haben eine geringere Verschattung durch die Frontseitenmetallisierung gemeinsam. Die verlässliche Messung solcher Solarzellen stellt besondere Anforderungen an die Messtechnik (s. Abschnitt 8.1 und 8.2).

Als Übergangsstruktur von der Standardsolarzelle zur RSK Solarzelle, bei welcher die Prozessierung sich Wesentlichen weniger verändert, dient die MWT (Metal-Wrap-Through) Solarzelle. Hierbei werden lediglich die Busbars auf die Rückseite verlegt. Die Frontseitenmetallisierung wird durch lasergebohrte Löcher auf die Rückseite des Wafers kontaktiert, wo sich die Busbars befinden.

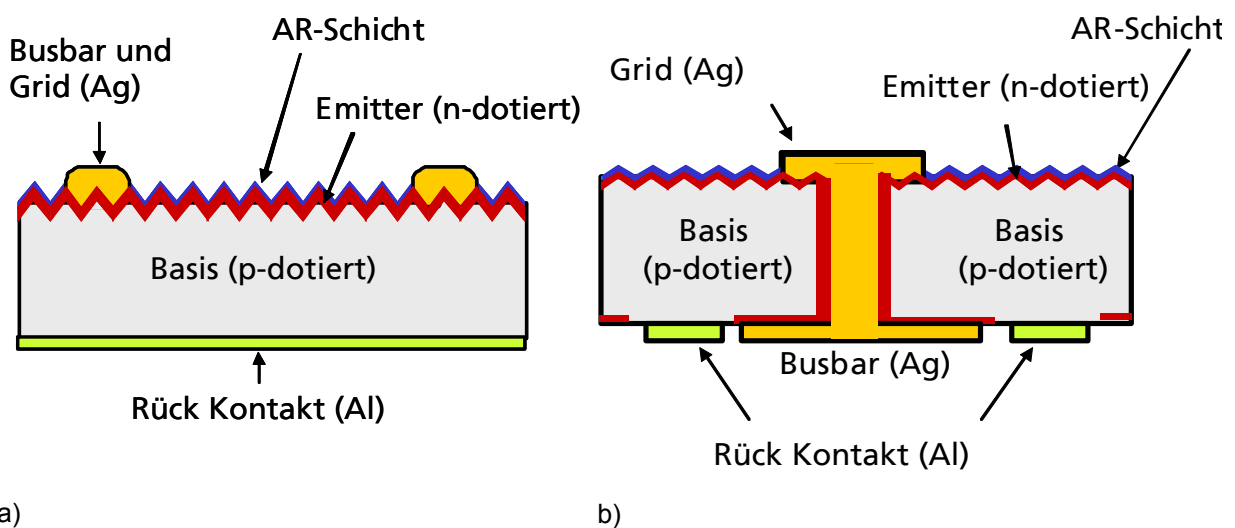


Abbildung 2.9: a) Standardsolarzelle mit Front und Rückkontakt. b) MWT (Metal-Wrap-Through) Solarzelle mit dem Busbar auf der Rückseite.

Für Basismaterial mit geringerer Qualität eignet sich das EWT (Emitter-Wrap-Through) Solarzellen Konzept, bei welchem der Emitter durch eine hohe Anzahl von Löchern durch den Wafer von Front- und Rückseite verbunden ist.

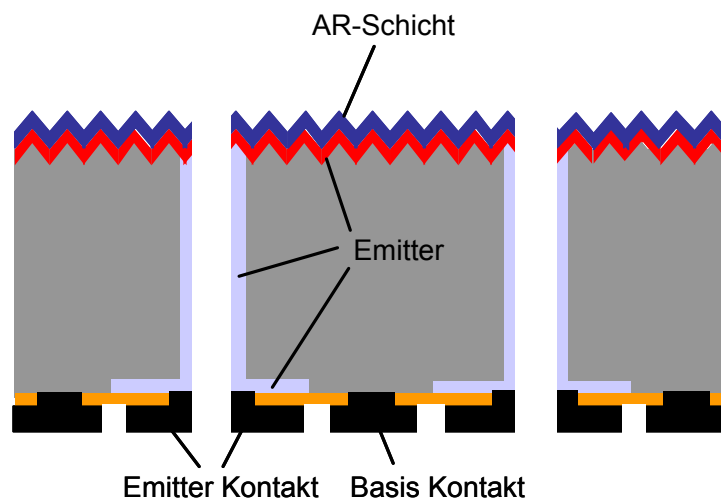


Abbildung 2.10: EWT (Emitter-Wrap-Through) Solarzelle.

2 Grundlagen

Rückkontaktsolarzellen auf hochreinem Material erreichen höchste Wirkungsgrade [25]. Die Kontaktstruktur wird durch eine Fingeranordnung (interdigitated grid, Abbildung 2.11) über die Rückseite verteilt.

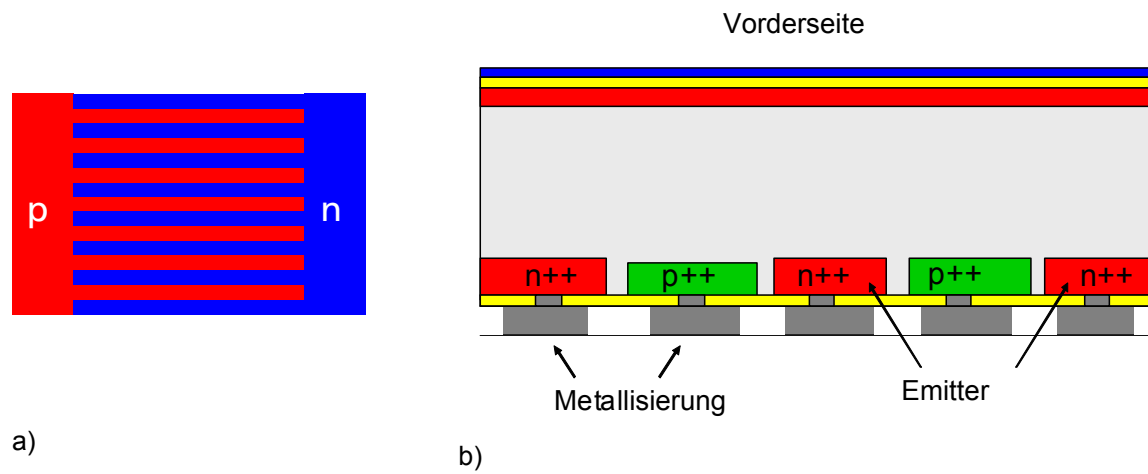


Abbildung 2.11: Struktur einer Rückseitekontakt solarzelle. a) Anordnung der Metallfinger. b) Aufbau der Zellstruktur mit den verteilten Emitterbereichen auf der Waferrückseite.

3 Hochpräzise Kalibrierung von Solarzellen

Dies Kapitel fasst die wichtigsten Kalibrierverfahren zusammen und erläutert speziell die Quantifizierung der spektralen Einflüsse. Des Weiteren wird hier erstmals der spektrale Anpassungsindex eingeführt, welcher in den Kapitel 6 und 7 verwendet wird. Die Grundlagen der Unsicherheitsbestimmung schließen das Kapitel.

3.1 Kalibriermethoden

Verschiedene Messmethoden und Prozeduren eignen sich zur Kalibrierung von Solarzellen nach IEC 60904-3 (vgl. [26]). Oft wird in primäre und sekundäre Kalibrierung unterschieden, um die direkte Kalibrierung gegen ein nationales Normal und die darauf folgenden Kalibrierungen gegen diese Referenzen zu unterscheiden. Jedoch werden bei den meisten „primären“ Kalibrierungen auch Transfer- und/oder Arbeitsnormale verwendet (vgl. Abschnitt 6.1.1), daher ist diese Unterscheidung nicht unbedingt genau und daher auch nicht zwingend erforderlich. Bei der Kalibrierung in Nationalen Metrologischen Instituten (NMI) steht die primäre Kalibrierung des Kurzschlussstromes unter Standard Test Bedingungen (STC) im Vordergrund des Interesses, auch wenn Solarzellen nach Leistung (P_{MPP}) verkauft werden. Referenzen werden zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke unter STC verwendet. Da der $I_{SC}(STC)$ im wesentlichen die Unsicherheit einer IV-Kennlinienmessung unter STC bestimmt, wird auch der Bestimmung des Kurzschlussstromes besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Zur Bestimmung des I_{SC} unter STC kann im wesentlichen unterschieden werden in integrale und spektral aufgelöste Messmethoden. Bei den integralen Messmethoden wird weiter in Indoor-(Labor) und Outdoor-(Freiland)messungen unterschieden. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Primärkalibriermethoden.

	Indoor	Outdoor	
Integral	Solarsimulatormethode (AIST, JRC*)	Direktstrahlmethode (NREL, JRC*)	Globalstrahlmethode (JRC)
Spektral	DSR (PTB)		

*optional, nicht Standard Methode

Tabelle 3.3: Primärkalibriermethoden der wichtigsten Solarzellenkalibrierinstitutionen weltweit.

Die Solarsimulatormethode ist ein Labormessverfahren (Indoor). Sie verwendet ein Spektralradiometer als TransfERNormal. Dieses wird absolut gegen ein Bestrahlungsstärkenormal kalibriert, um damit die Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators zu ermitteln bzw. den Simulator zu justieren. Damit entfällt die Referenzsolarzelle im Vergleich zur im Fraunhofer ISE Callab PV Cells angewandten sekundären Kalibriermethode. Der wesentliche Beitrag der Messunsicherheit resultiert aus dem Transfer der absoluten Bestrahlungsstärke. Dieses Messverfahren ist das Standardkalibrierverfahren des AIST in Japan für Primärkalibrierungen. Am JRC in Ispra kann dieses Verfahren optional genutzt werden, ist jedoch nicht das Standard Kalibrierverfahren.

Die Direktstrahlmethode verwendet Tubusse als Einkoppeloptik für die Solarzellen und ein Absolut Cavity Radiometer, welches mit einer Unsicherheit von 0.1-0.2% die Einstrahlung mit einem Öffnungswinkel von 5° misst [27, 28].

Die Globalstrahlmethode verwendet keinen Tubus, setzt aber zusätzlich zum Absolut-Cavity Radiometer ein Pyranometer ein, welches abgeschattet den diffusen Anteil der Sonnenstrahlung zusätzlich misst.

Beide Messmethoden sind Freiland (Outdoor) Messmethoden, welche optimale meteorologische Bedingungen erfordern. Bei der Globalstrahlmethode [26] kommt der größte Beitrag zur

Messunsicherheit in Höhe von 0.2 % von der kombinierten Einstrahlungsmessung aus Direkt- und Globalanteil.

Die Direktstrahlmethode ist das Standard Kalibrierverfahren für Primärkalibrierungen am NREL in Colorado (USA). Am JRC in Ispra ist die Globalstrahlmethode das Standardmessverfahren.

Als derzeit einziges Institut führt die PTB spektral aufgelöste Primärkalibrierungen an Solarzellen unter Standard Test Bedingungen durch. Dies basiert auf der DSR-Methode [29]. Da dieses Messverfahren in ähnlicher Form zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit im Fraunhofer ISE CalLab PV Cells genutzt wird und weitere Untersuchungen ein wichtiger Teil dieser Arbeit sind, wird auf dieses Messverfahren näher eingegangen.

Hierbei wird die differentielle spektrale Empfindlichkeit bei unterschiedlichen Biasbestrahlungsstärken durchgeführt und anschließend werden mittels numerischer Integration die Kalibrierwerte unter STC ermittelt.

Bei diesem Messverfahren wird die monochromatische Strahlung moduliert und zusätzlich mittels konstanter Biasbestrahlung die Solarzelle auf ein bestimmtes Bestrahlungsniveau gesetzt. Mit einem Lock-in Verstärker wird das AC-Signal, welches die moduliert monochromatische Strahlung verursacht, gemessen. Die so ermittelten differentiellen spektralen Empfindlichkeiten werden nun für verschiedene Biasbestrahlungsstärken aufintegriert zur spektralen Empfindlichkeit unter STC.

$$SR(\lambda) = \frac{I_{STC}}{\int_0^{I_{STC,bias}} \frac{1}{DSR(\lambda, I_{bias})} \partial I_{bias}} \quad (3.27)$$

Dies gilt sowohl für lineare, als auch für nichtlineare Solarzellen. Die obere Integrationsgrenze wird durch Annäherung der oberen Integrationsgrenze der folgenden Gleichung ermittelt:

$$E(STC) = \int_0^{I_{STC,bias}} \frac{1}{I_{SC,AMX}^{DSR}(I_{bias}) \cdot E(STC)^{-1}} \partial I_{bias} \quad (3.28)$$

Wobei $E(STC) = 1000 \text{ W/m}^2$ (für AM1.5g) gilt. In dieser Gleichung werden die $I_{SC,AMX}^{DSR}(I_{bias})$ durch Gewichtung der differentiellen spektralen Empfindlichkeiten mit dem jeweiligen Referenzspektrum (z.B. X = 1.5g für AM1.5g) ermittelt:

$$I_{SC,AMX}^{DSR} = \int DSR(\lambda) AMX(\lambda) \partial \lambda \quad (3.29)$$

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass alle für Referenzsolarzellen relevanten Eigenschaften wie Spektrale Empfindlichkeit, auch deren Temperaturabhängigkeit und die daraus berechneten integralen Werte ($I_{SC}(STC)$ und $Tk(I_{SC})$) hochgenau ermittelt werden.

Das sekundäre Kalibrierverfahren wird am Fraunhofer ISE CalLab PV Cells mittels eines Sonnensimulators, welcher eine dem Standardspektrum ähnliche Bestrahlung erzeugt, realisiert. Die Intensität der Bestrahlung wird mittels einer primärkalibrierten Referenzsolarzelle ermittelt. Die Messung der spektralen Bestrahlungsstärke erfolgt mit einem Spektralradiometer, welches die relative spektrale Bestrahlungsstärke ermittelt. Mit einer Korrektur des spektralen Mismatch (vgl. Abschnitt 3.2) wird bei der Messung die Abweichung zum Normspektrum berücksichtigt.

3.2 Der spektrale Mismatch

Beim Vergleich zweier Solarzellen unter STC mit einer integralen Messmethode wird meist ein künstliches Sonnenspektrum verwendet. Ein solches Sonnensimulatorspektrum wird häufig mit Xenon Kurzbogen- (Dauerlicht) oder Blitzlampen erzeugt. Ebenso kommen auch Quecksilberdampf lampen oder Halogenlampen zum Einsatz. Der Einsatz einer Filterung ist meist unerlässlich und stellt oft eine wesentliche Komponente zur Optimierung der spektralen Bestrahlungsstärke dar. Ziel ist es das standardisierte AM1.5g Spektrum [30] möglichst genau nachzubilden. Die dennoch auftretenden Abweichungen der spektralen Bestrahlungsstärke zum Normspektrum können zusammen mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften der zu vergleichenden Solarzellen zu einer signifikanten Stromabweichung führen. Dies ist bekannt als spektrale Fehlanpassung bzw. spektraler Mismatch [31].

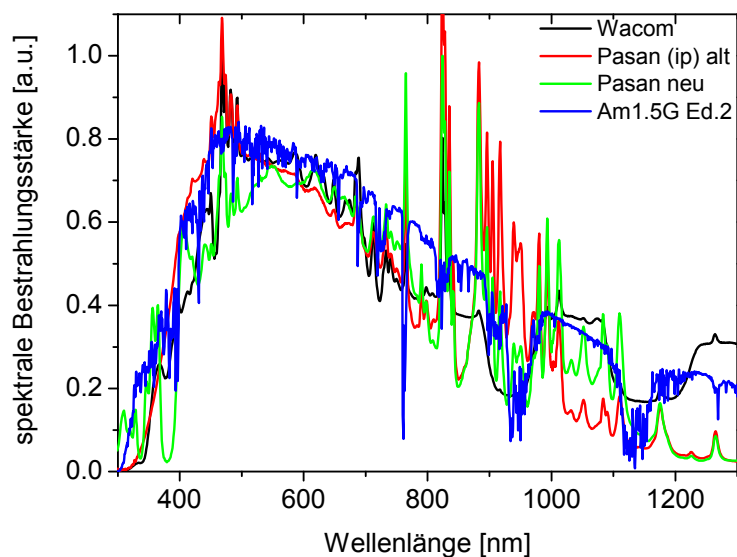


Abbildung 3.12: Vergleich verschiedener Klasse A Sonnensimulatorspektren mit dem AM1.5g.

Die Quantifizierung dieser spektralen Fehlanpassung beruht auf dem Vergleich der Photoströme beider Solarzellen, welche unter jeweils beiden Spektren generiert werden.

$$I_{SIM,STC}^{RC,TC} = \int SR^{RC,TC}(\lambda) E_{SIM,STC}(\lambda) d\lambda \quad (3.30)$$

Die vom jeweiligen Spektrum erzeugten Photoströme werden ins Verhältnis gesetzt. Dabei ist gut zu erkennen, dass nur der relative Verlauf der SR (bezeichnet mit $sr(\lambda)$) benötigt wird.

$$\frac{I_{SIM}^{RC,TC}}{I_{STC}^{RC,TC}} = \frac{\int SR^{RC,TC}(\lambda) E_{SIM}(\lambda) d\lambda}{\int SR^{RC,TC}(\lambda) E_{STC}(\lambda) d\lambda} = \frac{c \int sr^{RC,TC}(\lambda) E_{SIM}(\lambda) d\lambda}{c \int sr^{RC,TC}(\lambda) E_{STC}(\lambda) d\lambda} \quad (3.31)$$

Der Quotient der Verhältnisse für RC und TC gibt ein Maß für die unterschiedliche Bewertung der beiden Spektren und ist zugleich der Korrekturfaktor.

$$\frac{I_{SIM}^{TC} / I_{STC}^{TC}}{I_{SIM}^{RC} / I_{STC}^{RC}} = MM \quad (3.32)$$

Hierbei wird deutlich, dass auch bei den Spektren nur der relative Verlauf eingeht. Der Fehler im gemessenen Strom aufgrund der Stromfehlanspassung würde MM-1 betragen. Der spektrale Mismatchfaktor kann auch zur Korrektur verwendet werden. Es empfiehlt sich dies in der Messprozedur so zu integrieren, dass die IV-Kennlinie der Solarzelle möglichst beim Strom unter STC betrieben wird.

$$I_{SIM}^{TC} \stackrel{!}{=} I_{STC}^{TC} \quad (3.33)$$

Damit erhält man zur Einstellung des Sonnensimulators für den mismatch-korrigierten Kalibrierwert der Referenzsolarzelle:

$$I_{SIM}^{RC} = I_{STC}^{RC} / MM \quad (3.34)$$

Die Auswirkung der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen werden in Abschnitt 6.2.1 betrachtet.

3.3 Der Anpassungsindex

Als wichtiges Hilfsmittel zur Ermittlung der spektralen Anpassung zweier Solarzellen unter einem bestimmten Spektrum wurde in dieser Arbeit der Anpassungsindex eingeführt. Parallel dazu wurde diese Größe auch in [32] verwendet.

Der spektrale Mismatch setzt die Änderung des Photostromes eines Sensors zwischen zwei Spektren ins Verhältnis zu der Änderung des Photostromes eines zweiten Sensors für diese Spektren. Bewerten beide Sensoren die Unterschiede der Spektren in gleicher Weise so ist der spektrale Mismatch 1. Da der spektrale Mismatch eine integrale Größe ist, bei der sich die Unterschiede aus verschiedenen Wellenlängenbereichen ausgleichen können, ist die Aussagekraft über die spektrale Anpassung eher gering. Theoretisch ist es möglich mit zwei Sensoren mit gänzlich unterschiedlichen Spektralbereichen und zwei unterschiedlichen Spektren einen Mismatch von 1 zu erhalten. In einem solchen Fall wäre die spektrale Anpassung der Zellen zueinander jedoch nicht gegeben. Die Messunsicherheiten für den Mismatch-Faktor würden sehr groß werden (s. Abschn. 6.2.1). Um zwei Solarzellen unter einem Sonnensimulator möglichst gut vergleichen zu können, müssten die Bereiche der spektralen Stromdichten möglichst ähnlich sein. Dies motiviert die spektrale Anpassung wie folgt zu quantifizieren:

$$\Delta \hat{J}_{SR} = \int |\Delta \hat{J}(\lambda)| d\lambda = \int \left| \left(\frac{SR^{RC}(\lambda)}{\int SR^{RC}(\lambda) d\lambda} - \frac{SR^{TC}(\lambda)}{\int SR^{TC}(\lambda) d\lambda} \right) E^{SIM}(\lambda) \right| d\lambda \quad (3.35)$$

ΔJ_{SR} ist (bis auf einen Faktor) die Summe der Stromabweichungen (Beträge) unter dem Simulatorspektrum, diese kann als Maß für die spektrale Anpassung gewertet werden. Sie ist =0 für identische spektrale Empfindlichkeiten. Im Weiteren wird $\Delta \hat{J}$ als spektraler Anpassungsindex zur Auswahl der Referenzzellen bezeichnet. Beispiele für einige Referenzzellen des Callab PV Cells gegen eine multi-kristallinen Standard-Industriezelle zeigt die folgende Tabelle.

3 Hochpräzise Kalibrierung von Solarzellen

Referenzzelle	MM (spektraler Mismatch)	$\Delta\hat{J}$ (spektraler Anpassungsindex)
DF28	0.9935	2.009
ISE006	1.0082	2.014
ISE040	0.9948	24.016
SC33	1.0041	1.204
RS12	0.9868	3.816
TF31	0.9908	1.977

Tabelle 3.4: Zusammenstellung von spektralen Mismatch-Faktoren und spektralen Anpassungsindizes für einen Satz Referenzsolarzellen in Kombination mit einer mc-Si Industriesolarzelle.

Im Vergleich mit den Messunsicherheiten (s. Abbildung 6.7) erweist sich der Anpassungsindex als sinnvolle Erweiterung zur Auswahl der Referenzsolarzelle bei einer Kalibrierung unter einem Sonnensimulator. Lediglich bei der TF31 Referenzsolarzelle sind die Werte des Anpassungsindex und der Messunsicherheiten nicht ganz konsistent, was auf den ungewöhnlichen Verlauf der spektralen Empfindlichkeit dieser Solarzelle zurückzuführen ist.

3.4 Unsicherheitsrechnung

Die Bestimmung der Messunsicherheiten erfolgt nach dem „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (GUM) [33]. Hierbei bildet das Modell der Auswertung die Grundlage:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.36)$$

Die zu ermittelnde Ergebnisgröße Y wird mittels der Bestimmung der Eingangsgrößen X_i ermittelt. Die wesentliche Aufgabe besteht darin die Unsicherheiten der Eingangsgrößen $u(X_i)$ und deren Wahrscheinlichkeitsverteilung (Probability distribution Funktion; PDF) zu bestimmen. Nach GUM wird in zwei Typen Messunsicherheiten unterschieden:

- Typ A sind Messunsicherheiten, welche aus mehrmaliger Messung bei gleichen Bedingungen ermittelte empirische Standardabweichung abgeleitet wird.
- Typ B sind Messunsicherheiten, die aus anderen Abschätzungen abgeleitet werden:
 - Toleranzangaben von Herstellern
 - Abschätzung systematischer Messunsicherheiten mit entsprechender Fachkenntnis

Wird für die Messunsicherheiten als PDF eine Nicht-Gaußfunktion ermittelt, so sind zur Berechnung der Standardmessunsicherheit entsprechende Umrechnungsfaktoren zu berücksichtigen:

PDF	Umrechnungsfaktor
Gauß	1
Rechteck	$\sqrt{3} \approx 1.732$
Dreieck	$\sqrt{6} \approx 2.450$

Tabelle 3.5: Umrechnungsfaktor der Breiten von Wahrscheinlichkeitsverteilungen in eine 95,45 % (oft nur mit 95 % angegeben) Wahrscheinlichkeit vergleichbar mit einer Gaußverteilung.

Wird beispielsweise ein Widerstandswert mit Herstellungstoleranzen angegeben, wobei jedoch die Messunsicherheiten zur Sortierung erheblich kleiner sind als die Toleranzen, so kann von einer Rechteckverteilung ausgegangen werden

Die Kombination von Messunsicherheiten $u_c(y)$ wird nach dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz mittels der Quadratwurzel der Summe der Varianzen der unkorrelierten Eingangsgrößen ermittelt:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3.37)$$

Hierbei wird hinreichende Linearität der Modellfunktion f im Unsicherheitsintervall der jeweiligen Eingangsgröße vorausgesetzt.

Im allgemeinen Fall müssen Korrelationen mittels Korrelationskoeffizienten $r(x_i, x_j)$ berücksichtigt werden. So erweitert sich Gl. (3.37) zu:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) u_i(x_i) r(x_i, x_j) u_j(x_j) \quad (3.38)$$

Die so ermittelte Standardmessunsicherheit $u_c(y)$ wird bei der Angabe von Messunsicherheiten im Falle von Messungen photovoltaischer Elemente auf einen Bereich erweitert, der einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % entspricht (eine Chance von 1:20, dass der Wert außerhalb des Intervalls liegt). Um ein solches Vertrauensintervall festzulegen wird der Erweiterungsfaktor k eingeführt:

$$U = k u_c(y) \quad (3.39)$$

Mit der Annahme einer Normalverteilung wird dann der Erweiterungsfaktor entsprechend dem Grad des Vertrauens gewählt:

Grad p des Vertrauens [%]	Erweiterungsfaktor k
68.27	1
90	1.645
95	1.96
95.45	2
99	2.576
99.73	3

Tabelle 3.6: Wert des Erweiterungsfaktors k bei einem Grad des Vertrauens p mit der Annahme einer Normalverteilung.

Für Kalibrierung von Solarzellen wird im Allgemeinen $k=2$ gewählt.

Für kleine Stichproben normalverteilter Werte folgt die Varianz einer t-Verteilung, mit größerer Breite der Verteilung als die der Normalverteilung. Daher muss der effektive Freiheitsgrad der Messgröße nach der Welch Satterwaite-Formel ([33]) bestimmt werden:

3 Hochpräzise Kalibrierung von Solarzellen

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (3.40)$$

Ein effektiver Freiheitsgrad > 50 rechtfertigt die Verwendung der Erweiterungsfaktoren k vergleichbar mit einer Normalverteilung.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

Die Messung der Bestrahlungsstärke verursacht bei Solarzellenkalibrierungen den wesentlichen Messunsicherheitsbeitrag. Die spektrale Verteilung ist ebenfalls von hoher Bedeutung und muss daher genau bestimmt werden. In diesem Kapitel werden die Arbeiten dieser Dissertation zur Messung der spektralen Bestrahlungsstärke zusammengefasst. Dies umfasst den Aufbau eines Spektralradiometers und dessen Charakterisierung. Ebenso werden die genaue Funktionsweise und die zeitlichen Abläufe beim Messen und Auslesen der Diodenzeilen, welche für die Radiometrie an Blitzlampen erforderlich sind, detailliert beschrieben. Die Untersuchungen sind im Einzelnen aufgeführt und im Zusammenhang der gesamten Kalibrierkette beschrieben. Die jeweiligen Messunsicherheitsbeiträge, deren Ursprung, Ermittlung und Zusammenfassung ermöglichen damit hochpräzise und rückführbare Messungen.

4.1 Messmethode und Spektralradiometer

Die zur Kalibrierung verwendeten Sonnensimulatoren erzeugen eine breitbandige Bestrahlung, welche dem Normspektrum - z.B. durch Filterung - angenähert wird. Die präzise Messung dieser spektralen Verteilungen ist sowohl für die Optimierung der Sonnensimulatoren, als auch für die Korrektur des spektralen Mismatches notwendig. Zur Messung der spektralen Bestrahlungsstärke werden im Wesentlichen gitterbasierte Monochromatoren verwendet, welche mit einem spektralen Bestrahlungsstärkenormal kalibriert werden. Dieses Bestrahlungsstärkenormal ist eine Sylvania oder FEL Halogenlampe, deren Strahlungsspektrum aufgrund einer PTB Kalibrierung genau bekannt ist. Die Primärkalibrierung der PTB basiert auf einem Vergleich mit einem Hohlraumstrahler. Da für die Bewertung der spektralen Eigenschaften eines Sonnensimulators und auch für die Mismatchkorrektur nur die relative spektrale Bestrahlungsstärke notwendig ist, sind die Kalibrierprozeduren und Betrachtungen auf diesen Fall reduziert.

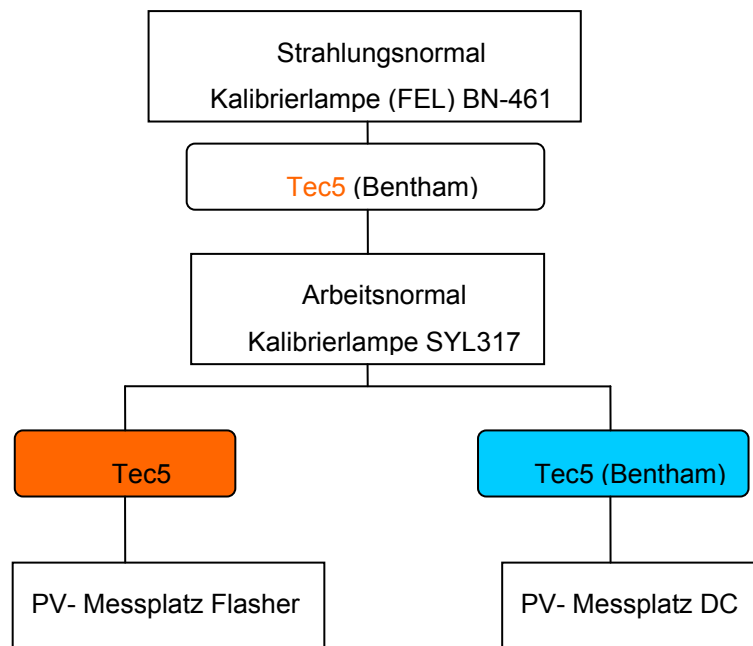


Abbildung 4.1: Kalibrierkette der spektralen Bestrahlungsstärke. Das Bentham Spektralradiometer befindet sich derzeit noch in der Evaluationsphase.

Die für ein Solarzellenkalibrierlabor typische Messsituation für die Messung der spektralen Verteilung der Bestrahlungsstärke ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Intensität des Sonnensimulators im Vergleich zur FEL/SYL Kalibrierlampe ist im UVVis um bis zu einem Faktor 60 höher als im NIR. Aus dieser Tatsache resultiert ein großer Teil der Messunsicherheiten.

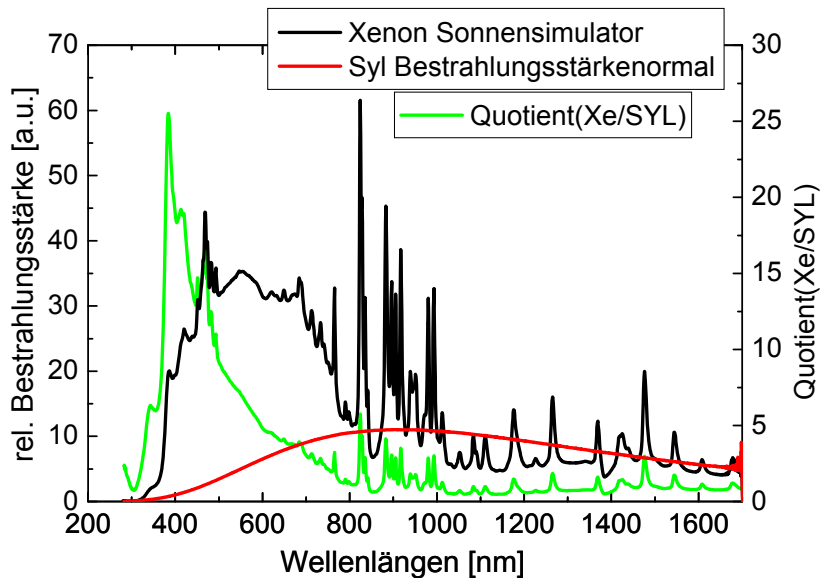


Abbildung 4.2: Vergleich der beiden Emissionsspektren des Bestrahlungsstärkenormal mit einer typischen Sonnensimulator-Spektralverteilung (Xenonentladungslampe). Der Quotient zeigt, in welchen Wellenlängenbereichen sich die nicht direkt korrelierten Messunsicherheiten am stärksten auswirken.

Prinzipiell ist die Verwendung von zwei unterschiedlichen Typen von Spektralradiometern möglich. Der erstere Typ basiert auf einem Drehgitterspektrometer, wie es z.B. auch zur Erzeugung von monochromatischer Strahlung für spektrale Empfindlichkeitsmessungen verwendet wird.

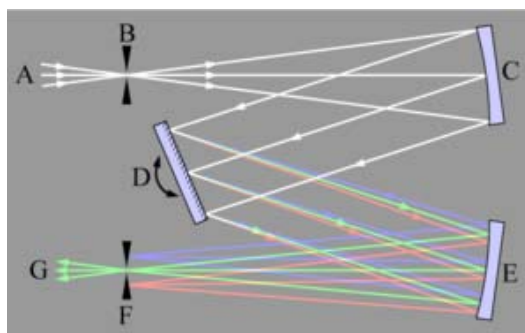


Abbildung 4.3: Schematischer Aufbau eines Drehgitterspektrometers aus [34]. A: breitbandige Strahlung, B: Eingangsspalt, C,E: Konkavspiegel, D: Drehgitter, F: Ausgangsspalt, G: monochromatische Strahlung.

Solche Monochromatoren bieten den Vorteil, dass man durch Serienschaltung von zwei identischen Einheiten das Streulicht bis 10^{-9} unterdrücken kann. Nachteilig wirkt sich die lange Messzeit über einen breiten Spektralbereich aus, da die Gitter zur Veränderung der Wellenlänge gedreht werden und dadurch nur eine Wellenlänge nach der anderen gemessen werden kann. Abhilfe schafft hier der zweite Typ von Spektralradiometern basiert auf einem Gitter und einer Sensorzeile, welche es erlaubt, mehrere

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

Sensoren (Pixel) gleichzeitig mit unterschiedlichen Wellenlängen zu bestrahlen und diese (quasi-) simultan auszulesen.

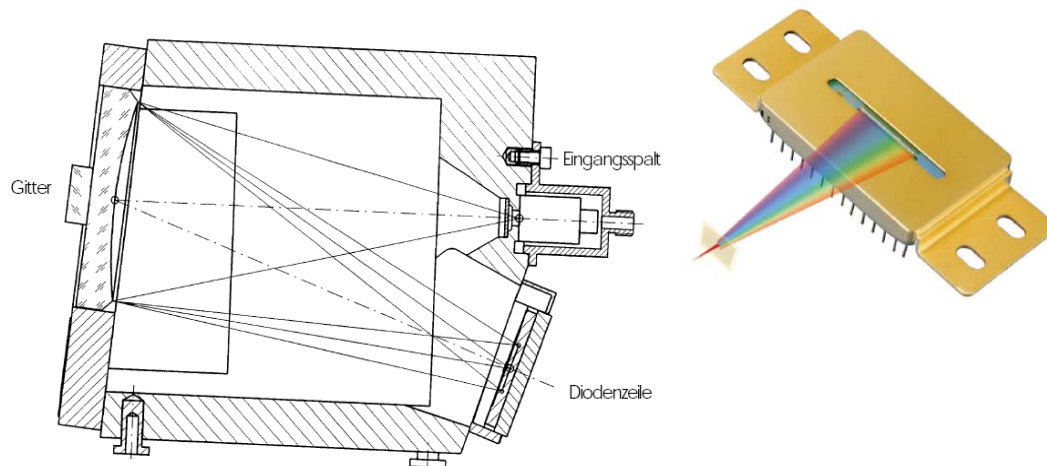


Abbildung 4.4: Schematischer Aufbau eines Diodenzeilen/CCD Spektラルradiometers aus [35] und ein von einem Dispersionselement (z.B. optisches Gitter) beleuchtetes Diodenarray aus [36].

Nachteilig bei diesem Typ Spektラルradiometer ist jedoch die fehlende Möglichkeit einer Serienschaltung mit einer zweiten Einheit zur Minimierung des Streulichtes. Damit werden bei guten Spektラルradiometern nur Werte von 10^{-5} für das Streulicht erreicht. Solche Diodenzeilen oder CCD-Zeilen Spektラルradiometer ermöglichen es auch mit sehr kurzen Integrationszeiten spektrale Verteilungen in Plateaus von Blitzen zu messen. Hierzu sind jedoch genaue Kenntnisse über die zeitlichen Abläufe der Belichtung und Auslesevorgänge notwendig.

Häufig werden lineare Diodenzeilen verwendet, diese sind linear in einem großen Dynamikbereich und können sehr schnell ausgelesen werden. Im Wellenlängenbereich bis 1100 nm kommen hierfür NMOS Silicium Diodenzeilen zum Einsatz.

4.2 Zeitliche Abläufe eines Diodenarrayspektラルradiometers / Messung von Blitzspektren

Die in dieser Arbeit verwendeten Si-Spektラルradiometer sind mit einer Hamamatsu S3904-512F (512 Pixel) ausgestattet, welcher von einer Elektronik der Firma Tec5 ausgelesen wird. Die Ausleseelektronik liest jedes Pixel direkt nach der Integrationszeit aus, während das nächste Pixel noch belichtet wird. Während des Auslesevorgangs ist die Belichtung des Pixels weiterhin aktiv. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt.

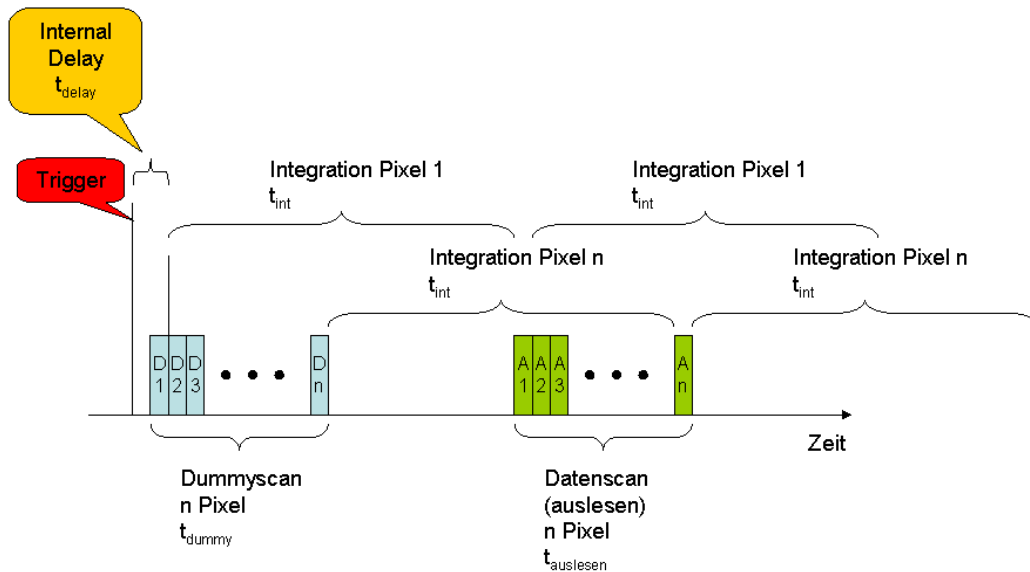


Abbildung 4.5: Ablaufschema für den Auslesevorgang eines NMOS Photo-Dioden-Array (PDA) Spektrometers.

Das parallele Auslesen und Belichten der einzelnen Pixel führt zu einer minimalen Gesamtmesszeit der Diodenzeile von $2 \cdot t_{\text{int}}$ bei minimaler Integrationszeit (Belichtungszeit) t_{int} . Im verwendeten Gerät beträgt die minimale Integrationszeit 0.6 ms, womit 1.2 ms Belichtungszeit für das gesamte Array notwendig wird. Speziell an diesem Gerät ist eine externe Triggeroption, welche es erlaubt mit einer kurzen internen Verzögerung (< 0.5 ms) und einer Genauigkeit von $< 1 \mu\text{s}$ einen Datenscan auszulösen. Da ein Einfluss der „Vorgeschichte“ der Diodenzeile auf die getriggerte Messung minimiert werden muss, wird die Diodenzeile zuerst einmal ausgelesen, ohne die Daten zu verwenden. Dies wird als Dummyscan bezeichnet. Der Dummyscan definiert gleichzeitig den Beginn der Belichtungszeit eines jeden Pixel. Zusätzlich gibt es einen Betriebsmodus, welcher vor der Messung die Diodenzeile mit minimaler Integrationszeit ausliest (ohne Verwendung der Daten). Dieser als Cleanscan bezeichnete Vorgang soll einen definierten Zustand der Diodenzeile schaffen. Der externe Trigger unterbricht diesen Cleanscan asynchron, wechselt zur eingestellten Integrationszeit und beginnt mit dem Messzyklus wie in Abbildung 4.5 dargestellt.

Bei der InGaAs Diodenzeile (512 Pixel) ist der Ablauf deutlich verschieden. Der Auslesevorgang startet nach der Belichtungszeit der ganzen Diodenzeile. Während des Auslesens ist die Diodenzeile blind. Dies ermöglicht es – im Gegensatz zur NMOS-Zeile – die minimale Integrationszeit unabhängig von der Auslesegeschwindigkeit der Diodenzeile festzulegen. Damit ist bei einer minimalen Auslesezeit der gesamten Diodenzeile von 1 ms eine minimale Integrationszeit von 0.1 ms möglich.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

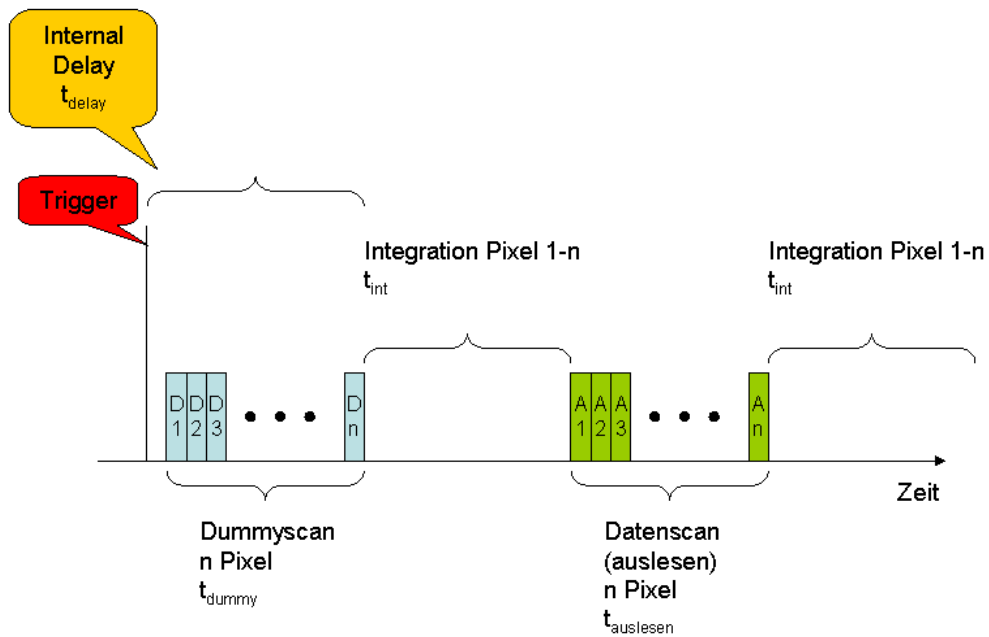


Abbildung 4.6: Ablaufschema für den Auslesevorgang eines InGaAs Photo-Dioden-Array (PDA) Spektrometers.

Bei der InGaAs Diodenzeile muss der Zeitablauf bei einer Blitzmessung lediglich so gewählt werden, dass der zu messenden Bereich zwischen zwei Auslesevorgängen liegt. Abweichungen davon führen lediglich zu einer anderen Messung des Absolutwertes der gemessenen spektralen Strahlungsverteilung. Aufgrund der Überschneidung von Integration und Auslesen verschiedener Pixel ist dies für die NMOS Zeile deutlich kritischer. Sind die zeitlichen Abläufe des Mess- und Ausleseprozesses bekannt, kann dies jedoch sehr gut berücksichtigt werden. In Abbildung 4.7 werden drei mögliche Situationen für das Messen einer spektralen Verteilung eines Blitzplateaus dargestellt.

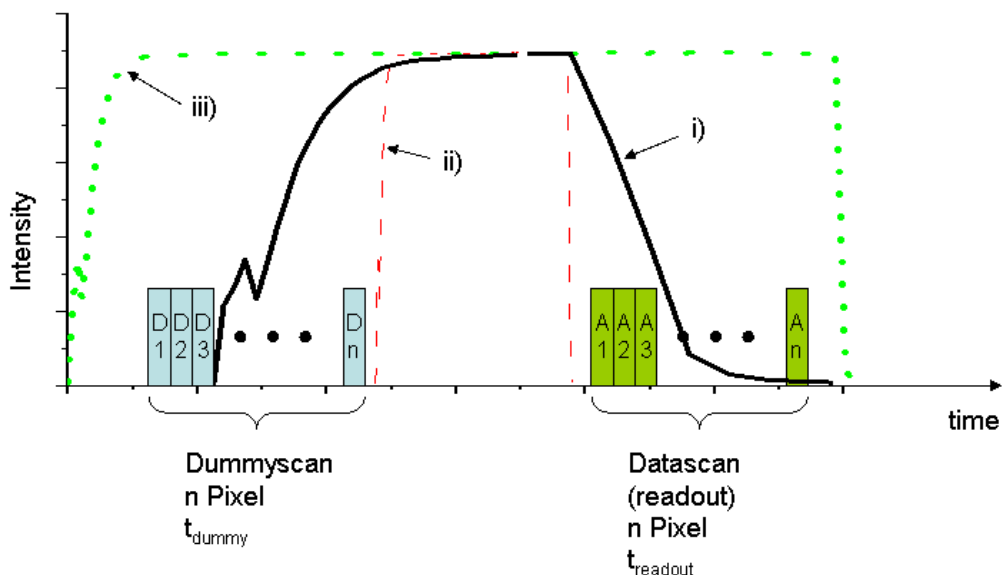


Abbildung 4.7: Mögliche Messsituationen mit einer NMOS Diodenzeile und Blitzintensitäten mit unterschiedlichem Zeitablauf.

Prinzipiell können drei verschiedene Messsituationen unterschieden werden:

- die Flanken der Blitzintensität liegen innerhalb der Auslesezeit der Diodenzeile
- die gesamte Blitzintensität liegt innerhalb der Integrationszeit ohne Auslesezeit
- das gesamte Blitzplateau liegt in der gesamten Integrationszeit inklusive der Auslesezeiten

Liegt eine der Flanken der Blitzintensität im Bereich eines Auslesens der NMOS Diodenzeile, so wird die Messung stark beeinflusst, da die Intensitätsänderung von verschiedenen Pixeln zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt gemessen wird. Dies kann mit der Messung eines sogenannten Burstscans (direkt aufeinander folgendes Belichten und Auslesen) an einem 12 ms Blitz -vergleichbar mit Messsituation i) - verdeutlicht werden.

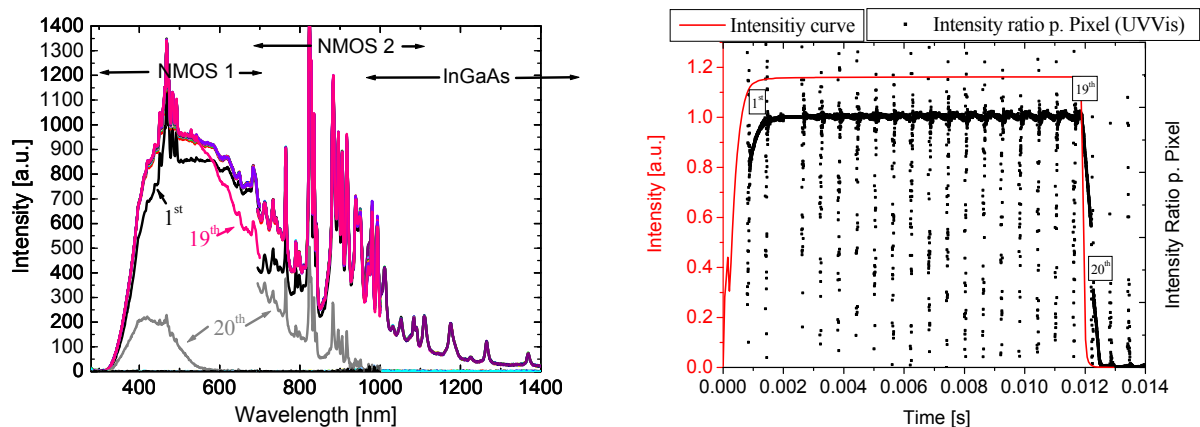


Abbildung 4.8: Messung an einem Blitz mit einem NMOS Diodenarray. Die Messdaten von 22 direkt aufeinanderfolgenden Spektren wurden auf den Scan Nr. 3 normiert um die Änderung des Messsignals zu verdeutlichen. Diese Änderungen sind von der Änderung der Gesamtintensität dominiert.

Die Messung wurde mit minimaler Verzögerung getriggert. Der DummSCAN verursacht eine Verzögerung von 0.6 ms. Die erste Messung findet noch deutlich in der ansteigenden Flanke des Blitzes statt. Zur Veranschaulichung wurden die Messdaten auf die erste Messung im Plateau (Messung 3) normiert.

Mittels eines Spektralradiometers, dessen minimale Auslesezeit und damit auch minimale Integrationszeit eingestellt werden kann, lässt sich die Auswirkung auf die Messung einer spektralen Verteilung eines Blitzlichtsonnensimulators und mögliche Fehlinterpretation gut verdeutlichen. Es wurde dazu der 12 ms Blitz mit zwei verschiedenen minimalen Integrationszeiten von 4.3 ms und 10.7 ms (entspricht 8.6 ms und 21.4 ms gesamter Belichtungszeit für alle Pixel) gemessen. Bei gleicher Verzögerungszeit von 1.5 ms ergeben sich zwei deutlich unterschiedliche Messergebnisse.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

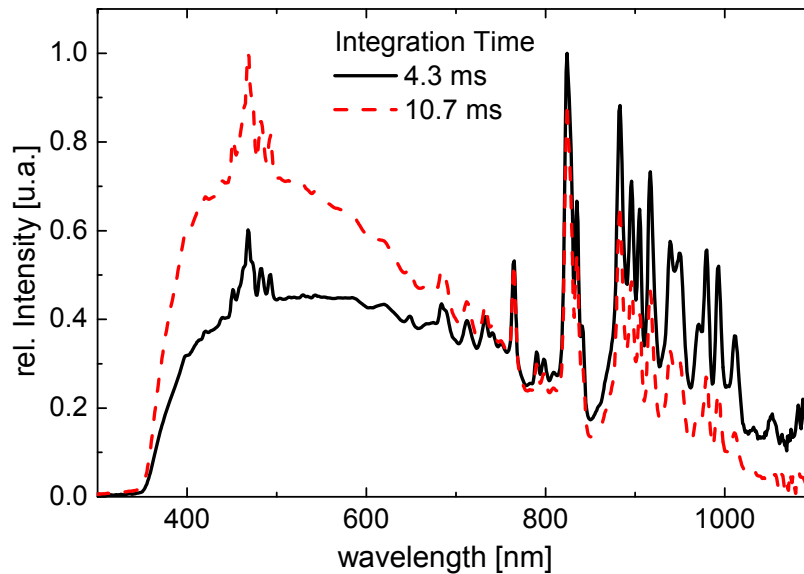


Abbildung 4.9: Messung eines 12 ms Xenonlampen-Blitzlichtsonnensimulators mit zwei verschiedenen minimalen Integrationszeiten.

Bei der ersten Messung liegt die gesamte Belichtungszeit innerhalb des Intensitätsplateaus (Messsituation iii)). Damit wird ein „rot-lastiges“ Klasse C Spektrum ermittelt. Wird die selbe Messung mit 21.4 ms Belichtungszeit durchgeführt, wird die Diodenzeile erst nach Beenden des Blitzes ausgelesen. Damit hat das letzte Pixel effektiv weniger Belichtungszeit erhalten als das erste. Dies führt zu einer gemessenen „blau-lastigen“ spektralen Verteilung. Es ist damit offensichtlich möglich dieses Klasse C Spektrum auch als Klasse A Spektrum zu messen. Dazu kann eine Messsituation gewählt werden, welche zwischen diesen beiden Messsituationen liegt.

Da bei der Messung einer Solarzelle mittels Blitzlichtsonnensimulator meist die Messung in der Plateauzeit des Blitzes stattfindet, ist die Messung der Spektralen Verteilung in diesem Plateau von Interesse und daher wird Messsituation iii) zur Messung der spektralen Verteilung eines Blitzlichtsonnensimulators angewandt.

Es gibt jedoch auch Messverfahren die es erfordern (leider gibt es auch solche die es tun, aber nicht erfordern [37]), dass, während die Intensität sich ändert, eine Messung an Solarzellen oder auch Wafern durchgeführt wird. Besonders bekannt sind die SunsVoc- und die QSSPC-Methode [38]. Daher ist es von Interesse auch für solche Messsituationen Spektren zu bestimmen.

Da die genauen zeitlichen Abläufe der Messung bekannt sind, sollte es möglich sein, eine Korrektur anzuwenden, um die Intensitätsänderung des Blitzes zu korrigieren. Angenommen wird, dass sich der relative Spektralverlauf während der Zeitspanne der Messung nur vernachlässigbar ändert.

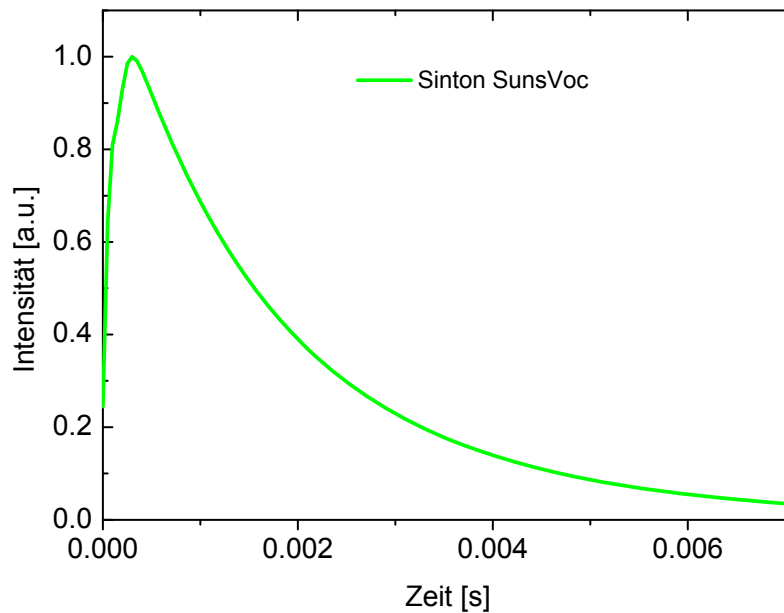


Abbildung 4.10: Intensitätsverlauf des SunsVoc Sinton Blitzes gemessen mit einer Silicium Solarzelle. Das SunsVoc-Messverfahren nutzt den abfallenden Teil des Blitzpulses.

Zur Korrektur wird ein linearer Verlauf innerhalb eines Messzeitraumes angenommen. Daraus ergibt sich folgender Korrekturfaktor für Pixel/Wellenlänge i:

$$corrfac_i = 1 + \Delta I \left(1 - \frac{i}{n}\right) \quad (4.1)$$

corrfac_i: Korrekturfaktor für Pixel/Wellenlänge i

ΔI: Intensitätsänderung während eines Datenscans (gesamte Diodenzeile)

n: Anzahl Pixel/Wellenlänge

i: Pixel/Wellenlänge

Das während dieser Arbeit aufgebaute Spektrometersystem besteht aus zwei NMOS Diodenzeilen und einem InGaAs Sensor. Die NMOS Detektoren sind auf die Spektralbereiche 280-700 nm und 695-1100 nm aufgeteilt. Beide Sensoren sind identisch, lediglich die optische Anordnung ist verschieden. Der Intensitätsunterschied der Blitzflanke während des Durchlaufens einer Messung der Diodenarrays spiegelt sich in einem Unterschied im Überlappbereich (695-700 nm) beider Messungen der unterschiedlichen Diodenarrays wieder. Daher kann dieser Unterschied beider Sensoren zur Bestimmung der Korrektur genutzt werden.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

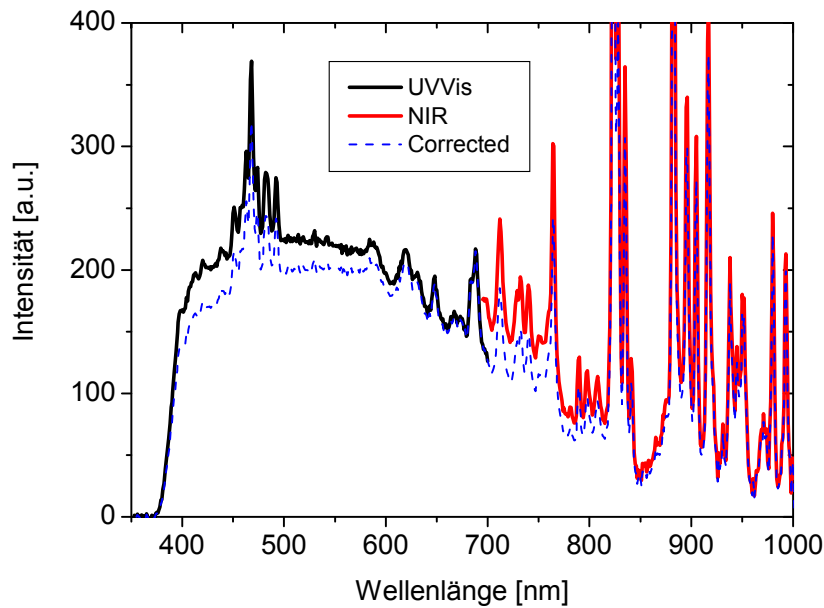
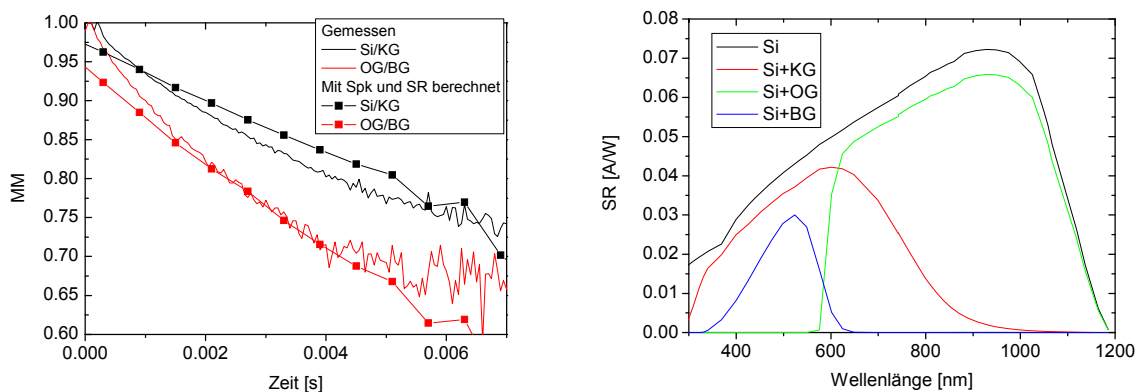


Abbildung 4.11: Messung der spektralen Verteilung des Sinton SunsVoc Blitzes in der abfallenden Flanke mit zwei NMOS Diodenarrayspektralradiometer (280-700 nm und 695-1100 nm). Im Überlappbereich ist ein Unterschied zu erkennen, welcher auf die 0.6 ms versetzte Belichtungszeit der Pixel zurückzuführen ist. Der Unterschied dieser Messpunkte kann direkt zur Korrektur genutzt werden.

Diese spektralen Verteilungen ermöglichen eine signifikante Verbesserung des Messverfahrens [39].

Um die so ermittelten spektralen Verteilungen zu überprüfen werden vier Sensoren mit stark unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten eingesetzt. Bei diesen Sensoren handelt es sich um speziell gefilterte Siliciumsolarzellen, welche mit einem Messwiderstand kurzgeschlossen sind. So kann die Intensität mit einer schnellen Messelektronik erfasst werden.



a)

b)

Abbildung 4.12: a) Quotienten aus den gemessenen Intensitäten mit Sensoren unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit und die aus den Spektren berechneten zugehörigen spektralen Mismatchfaktoren (bezogen auf das erste gemessene Spektrum anstatt auf eine Standardspektralverteilung). b) Spektrale Empfindlichkeiten der unterschiedlichen Sensoren. Die Werte in a) zeigen eine gute Übereinstimmung, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Zuordnung der Zeitskalen einer Unsicherheit unterliegt.

Die Übereinstimmung der berechneten und gemessenen spektralen Fehlanpassung (Mismatch) zeigt, dass das angewandte Korrekturverfahren gut funktioniert. Es wurde jedoch auch bei einem anderen Messplatz eine weniger gute Übereinstimmung festgestellt. Daher ist es notwendig, eine Überprüfung mit einem Verfahren wie es hier vorgestellt wurde, durchzuführen.

4.3 Analyse von Eigenschaften und Messunsicherheiten des eingesetzten Diodenarray-Spektralradiometers

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein mobiles Messsystem aufgebaut, welches es erlaubt Blitzlicht Sonnensimulatoren entsprechend IEC 60904-9 zu vermessen. Im Folgenden werden die Eigenschaften dieses Messsystems dargestellt und die Messunsicherheiten ermittelt. Dieses Messsystem enthält im wesentlichen zwei Messgeräte:

- Vielkanal Multimesskarten zum Auslesen eines Solarzellenarrays (64 Solarzellen) für die Homogenitätsmessung
- ein Spektralradiometer bestehend aus drei Modulen der Firma Zeiss mit Photodiodenarrays (PDA):
 - MCS-UVVis
 - MCS-NIR
 - PGS-NIR

Bezeichnung:	Wellenlängenbereich [nm]	Sensor	Wellenlängenbereich [nm] Sensor
MCS UV-Vis	280-700	Silicium	280-1100
MCS NIR	695-1100	Silicium	280-1100
PGS NIR	950-1710	InGaAs	950-1710

Tabelle 4.1: Mess- und Empfindlichkeitsbereiche der drei Sensoren und Spektrometermodule.

Zur Nutzung des Spektralradiometers für rückführbare Messungen sind genaue Kenntnisse über die Eigenschaften des Systems erforderlich [40]. Diese werden im folgenden Abschnitt detailliert dargestellt.



a)



b)

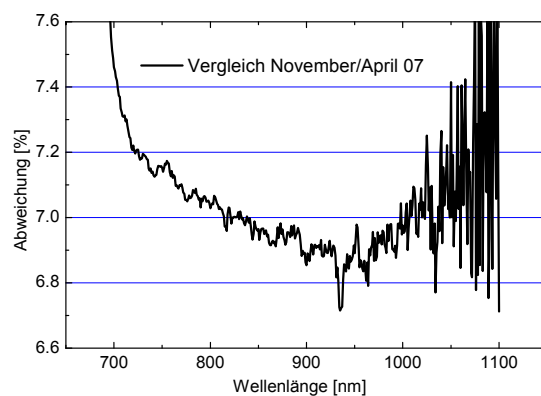
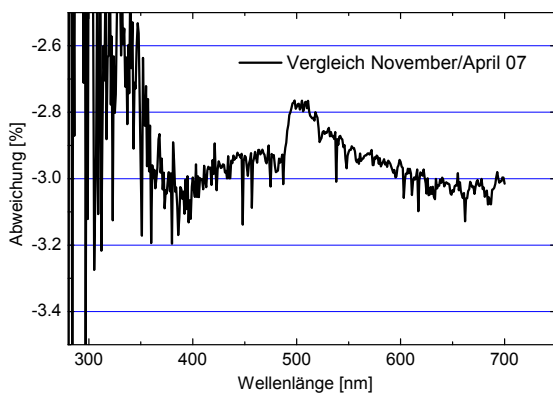
Abbildung 4.13: a) Mobiles Messsystem zur Vermessung von Blitzlicht Sonnensimulatoren entsprechend IEC 60904-9. b) Diffusor als Einkopplungsoptik für die drei Spektrometerkassetten.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

Eine externe Triggereinheit ermöglicht via TTL-Signal eine auf 100µs genaue Triggerung der einzelnen Spektrometermodule. Die Strahlung des Messobjektes wird mittels eines ebenen Diffusors in die LWL eingekoppelt.

4.3.1 Die Reproduzierbarkeit

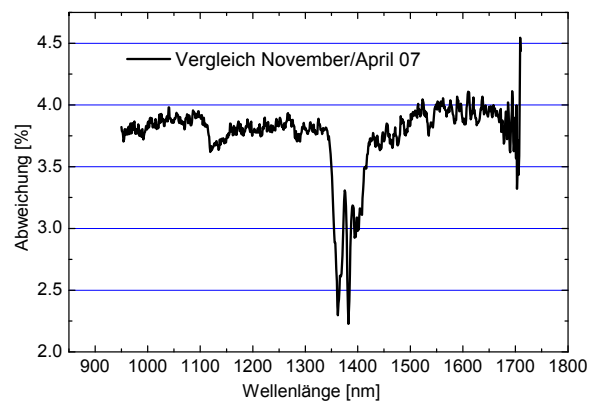
Die Langzeitreproduzierbarkeit des Spektrometersystems wird bei der regelmäßigen Rekalibrierung überprüft. Dabei kommen FEL oder SYLVANIA (vgl. Abbildung 4.1) Halogenstrahler zum Einsatz. In Abbildung 4.14 sind die Abweichungen zweier Kalibrierungen der einzelnen Spektrometermodule dargestellt. Die Absorptionsmaxima der in den Lichtwellenleitern enthaltenen OH-Gruppen bei 950 nm und vor allem bei 1380 nm sind deutlich zu erkennen (Diffusion von H₂O).



a)

b)

Abbildung 4.14: Langzeitreproduzierbarkeit der drei Spektrometer Module. Die Absolutabweichung ist auf die Reproduzierbarkeit der Lichtleitermontage und Verbiegung der Lichtleiter zurückzuführen. Die Abweichung bei 700 nm in a) des MCS-NIR ist auf die thermische Drift der Absorptionskante des eingesetzten RG665 Blockungsfilters am Eingang des Lichtleiters zurückzuführen. Daher wurde dieser durch einen RG645 ersetzt. Bei c) (PGS-NIR) ist eine Absorption des Lichtleiters (OH-Bande) bei 1340-1450 nm zu erkennen, welche sich um 2 % geändert hat.



c)

Die Demontage der LWL zwischen Kalibrierung des Spektrometers und der Messung wird zukünftig vermieden und der RG665 wurde gegen einen RG645 ersetzt. Daher resultieren die folgenden Beiträge zur Messunsicherheit:

Wellenlänge [nm]		U_R
PDF	Rechteck	
>280-1240	0.25%	0.14%
>1240-1430	1.50%	0.87%
>1430-1710	0.25%	0.14%

Tabelle 4.2: Messunsicherheiten aus den Reproduzierbarkeiten abgeschätzt.

4.3.2 Die Wellenlängengenauigkeit

Die Wellenlängenkalibrierung wurde mit verschiedenen Linienstrahlern und Laserquellen durchgeführt. Dabei standen für den Bereich oberhalb 1000 nm keine tauglichen Quellen zur Verfügung. Die Verwendung zweiter Ordnungen zur Kalibrierung ist durch die integrierten Blockungsfilter in den Spektrometermodulen nicht möglich.

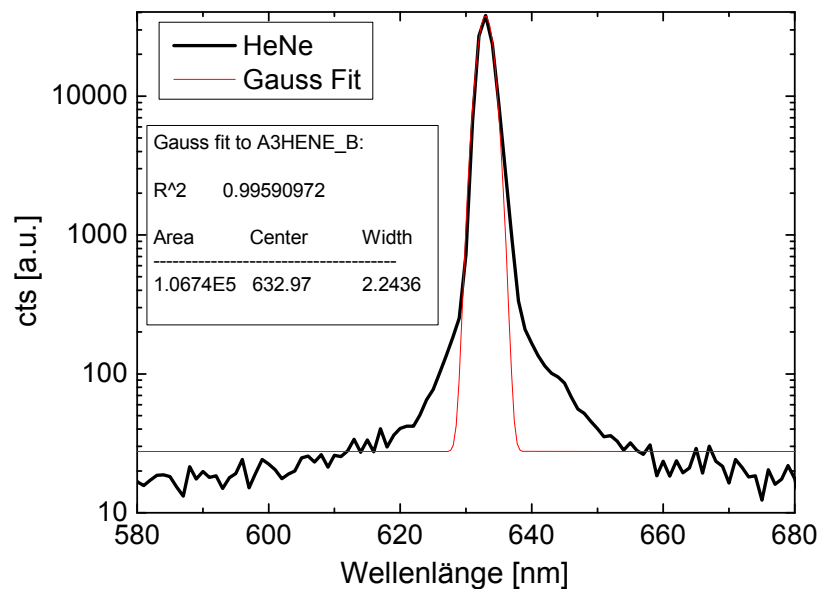


Abbildung 4.15: Messung des HeNe-Lasers mit dem UVVis-Spektrometermodul. Die Breite der Gaußkurve wurde zu 2.24 nm bestimmt.

Wie in Abbildung 4.15 gezeigt wurden die gemessenen Kurven mit einer Gaußkurve angepasst und daraus die Lage der Linien bestimmt.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

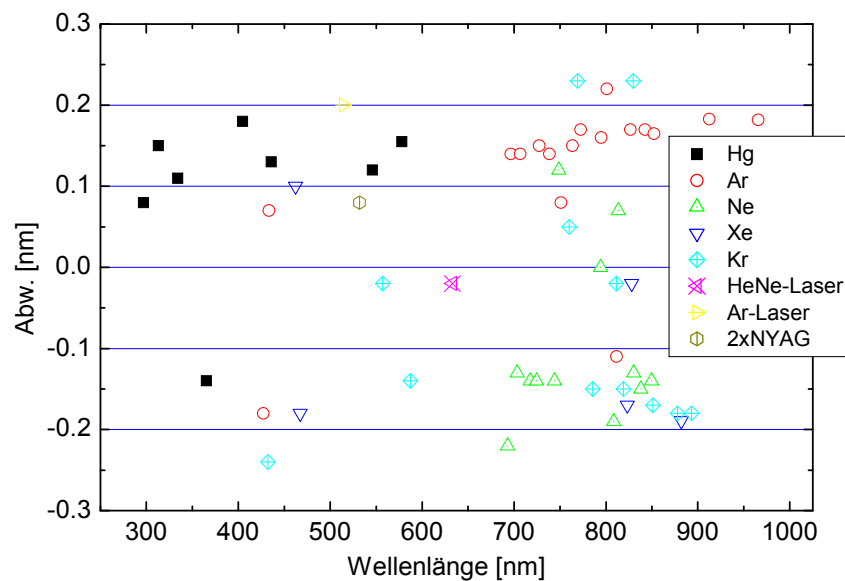


Abbildung 4.16: Auswertung der Wellenlängenkalibrierung der MCS Module. Es sind die Abweichungen zur Sollwellenlänge aufgetragen. Oberhalb 1000 nm standen keine exakten Strahlungsquellen zur Verfügung.

Die Abweichungen liegen im vom Hersteller spezifizierten Bereich von ± 0.3 nm und zeigen keine systematische Abweichung (vgl. Abbildung 4.16). Mit der Annahme einer systematischen Abweichung von 0.3 nm können die Abweichungen auf eine gemessene Spektralverteilung berechnet werden:

$$\Delta_{WL} = \frac{E(\lambda) - E(\lambda - 0.3nm)}{E(\lambda)} \tag{4.2}$$

4.3.3 Die Spektrale Auflösung

Die optischen Auflösungen der einzelnen Spektrometermodule sind wie folgt vom Hersteller angegeben und konnten im UV-Vis mit Lasermessungen verifiziert werden (vgl. Abbildung 4.15):

	Bandbreite [nm]
MCS UV-Vis	2.4
MCS NIR	3
PGS NIR	5

Tabelle 4.3: Optische Auflösung der Gitterspektrometermodule.

Die Auswirkung der begrenzten optischen Auflösung kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$SpectralDistortion = E_{\lambda}^{obs} \left(\lambda_o + \frac{\Delta\lambda_e}{2} \right) - E_{\lambda}^{obs} \left(\lambda_o - \frac{\Delta\lambda_e}{2} \right) \tag{4.3}$$

Die optische Auflösung hat bei der Messung des Bestrahlungsstärkennormals, aufgrund des glatten Kurvenverlaufes, nur einen vernachlässigbaren Einfluss ($<10^{-4}$). Das durch die Emissionslinien stark strukturierte Spektrum einer Xe-Lampe führt zu einem sehr großen Einfluss, jedoch auf einen sehr kleinen Wellenlängenbereich (vgl. Abbildung 4.17).

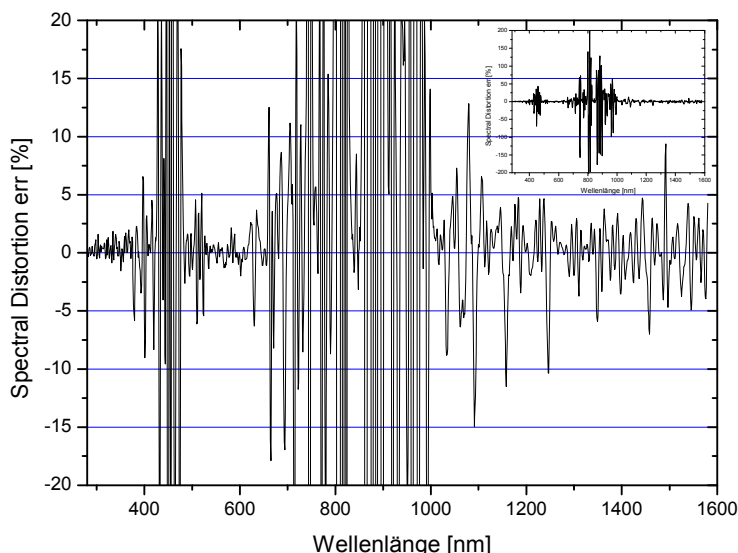


Abbildung 4.17: Die Auswirkungen der optischen Auflösung (begrenzt durch die Gitterdispersion) können für ein Xenonlampenspektrum näherungsweise berechnet werden.

Dabei weicht die Messung an den stark ausgeprägten Flanken des Xenon Kurzbogenspektrums vom realen Spektrum ab. Für die Anwendung in der Solarzellen-Kalibrierung sind solche lokalen Verschiebungen innerhalb einer Spektralverteilung wenig relevant, da im Allgemeinen integrale Größen berechnet werden.

4.3.4 Die Linearität

Wie bereits in Abbildung 4.2 gezeigt, sind die Messsituationen bei der Kalibrierung und der Messung des Strahlungsspektrums des Sonnensimulators sehr verschieden. Daher ist es unerlässlich die Linearität des Spektralradiometers hinsichtlich der Strahlungsintensitäten zu untersuchen. Das Messsignal S des Spektralradiometers ergibt sich in Abhängigkeit der Strahlungsverteilung $E(\lambda)$ und der Empfindlichkeit des Messgerätes R , wobei R im nichtlinearen Fall von der Strahlungsleistung φ bzw. dem Messsignal S selbst abhängt.

$$S = kE(\lambda)R(\varphi) = kE(\lambda)R(S) \quad (4.4)$$

Da diese Änderung von R als klein angenommen wird liegt es nahe $R = R_0 + \Delta R(S)$ zu setzen und

$$S + kE(\lambda)\Delta R(S) = kE(\lambda)R_0$$

$$S \left[1 + \frac{kE(\lambda)\Delta R(S)}{S} \right] = kE(\lambda)R_0 \quad (4.5)$$

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

wobei sich die linke Seite als Polynom entwickeln lässt:

$$S[1 + aS + bS^2 + cS^3 + dS^4 \dots] = kE(\lambda)R_0 \quad (4.6)$$

Zur messtechnischen Untersuchung der Nichtlinearität bieten sich mehrere Möglichkeiten an [41]. Zum einen kann zur Ermittlung größerer Nichtlinearitäten mit der Abstandsquadrat-Methode gearbeitet werden. Dabei werden von einem Punktstrahler ausgehend in verschiedenen Abständen die Intensitäten der Strahlungsquelle gemessen und gegen das Abstandquadrat aufgetragen.

$$I_{meas} \propto \frac{1}{r_{meas}^2} \quad (4.7)$$

Da dieser Zusammenhang nur bei einem Punktstrahler, also in der Realität nur bei großen Abständen vorliegt, können mit diesem Verfahren im besten Fall Nichtlinearitäten im Bereich von einigen Prozent ermittelt werden. Eine genauere Bestimmung lässt die Superpositionsmethode zu.

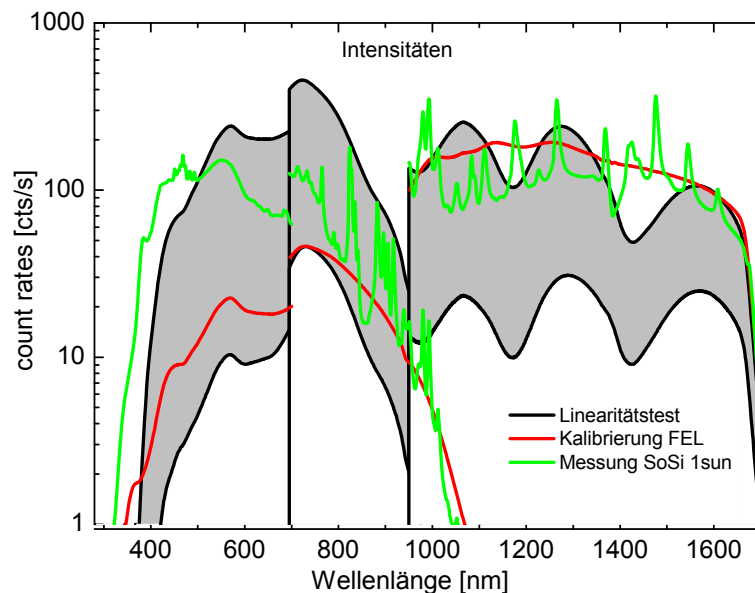


Abbildung 4.18: Intensitäten beim Einsatz der Spektralradiometer (Kalibrierung mit FEL-Lampe und Xe-Sonnensimulator) im Vergleich zum Intensitätsbereich der zur Bestimmung der Nichtlinearitäten nach dem Superpositionsprinzip (Beam-Addition-Method) genutzt wird.

Dabei wird mit zwei Strahlungsquellen gearbeitet, welche überlagert werden können. Aus Messungen der einzelnen Strahlungsquellen (A und B) und der Kombination (C) beider können die Abweichungen von der Linearität bestimmt werden. Der untersuchte Intensitätsbereich ist in Abbildung 4.18 im Vergleich mit den Intensitäten eines Xenonlampen-Sonnensimulators und eines Bestrahlungsstärkenormal (FEL) dargestellt. Die Strahlungsquellen A, B und C ergeben Messsignale S_1 , S_2 und S_3 .

$$C = A + B \quad (4.8)$$

Berücksichtigt man Gleichung (4.6) und stellt nach den Koeffizienten des Polynoms um, erhält man:

$$(S_1^2 + S_2^2 - S_3^2)a + (S_1^3 + S_2^3 - S_3^3)b + (S_1^4 + S_2^4 - S_3^4)c + (S_1^5 + S_2^5 - S_3^5)d = S_3 - S_1 - S_2 \quad (4.9)$$

Werden solche Wertetripel für mehrere Intensitäten ermittelt, kann mit Hilfe eines Gleichungssystems eine Linearitätskurve berechnet werden (vgl. Abbildung 4.19).

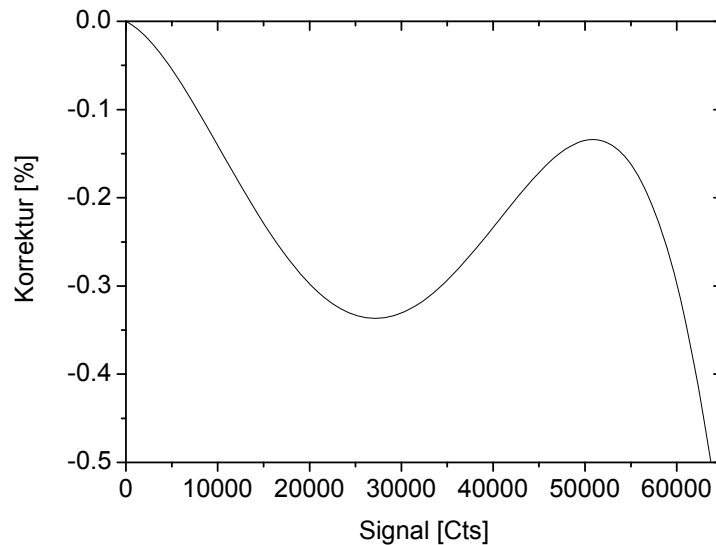


Abbildung 4.19: Abweichung von der Linearität als Polynom berechnet aus den Messdaten der Superpositions-Methode.

Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist vorwiegend begrenzt durch die Stabilität der eingesetzten Lampen (bzw. ihrer Stromversorgungen). Die Messungen wurden mit einem Messaufbau durchgeführt, welcher nicht eigens dafür entwickelt wurde. Daher ist weder die Spektralverteilung der verwendeten Lampen noch deren Stabilität optimal. Für die benötigte Abschätzung der Größenordnung des Effekts ist der Messaufbau jedoch ausreichend.

Da die Messergebnisse Abweichungen von der Linearität im Bereich von 1 % zeigen, werden diese nur zur Abschätzung der Messunsicherheiten genutzt und nicht als Korrektur eingesetzt.

Zur optimalen Aussteuerung der Messelektronik des Spektralradiometers kann mit verschiedenen Integrationszeiten gemessen werden. Die eher geringen Intensitäten des Bestrahlungsstärkennormals und die höheren der Sonnensimulatoren (vgl. Abbildung 4.2 und Abbildung 4.18) erfordern die Verwendung unterschiedlicher Integrationszeiten. Daher spielt auch die Linearität hinsichtlich unterschiedlicher Integrationszeiten eine wichtige Rolle.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

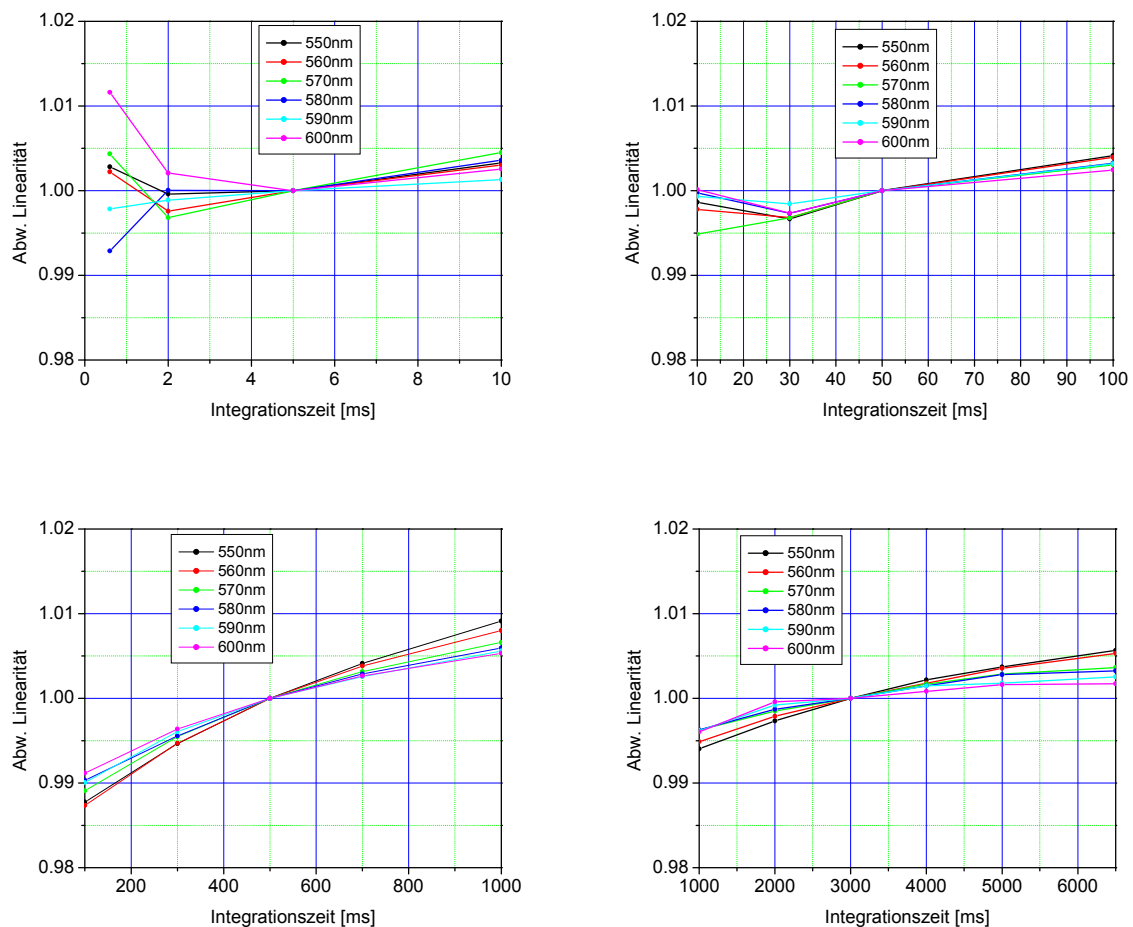


Abbildung 4.20: Bestimmung der Linearität der Messelektronik. Messung über gesamten Bereich der Integrationszeiten mit verschiedenen Intensitäten. Bei der Auswertung wurde eine Referenzintegrationszeit willkürlich festgelegt. Die gesamten Unterschiede im Integrationszeit-Intervall zwischen Kalibrierung und Messung sind relevant.

Die Untersuchung der Linearität der Messelektronik durch die Variation der Integrationszeiten wurde an allen Spektrometermodulen durchgeführt und ist in Abbildung 4.20 beispielhaft für das MCS-UVVis Modul dargestellt.

4.3.5 Thermische Drift

In der Aufwärmphase der Spektrometermodule zeigen sich Auswirkungen im Bereich 0.1-1 % innerhalb 60-90 min (vgl. Abbildung 4.21).

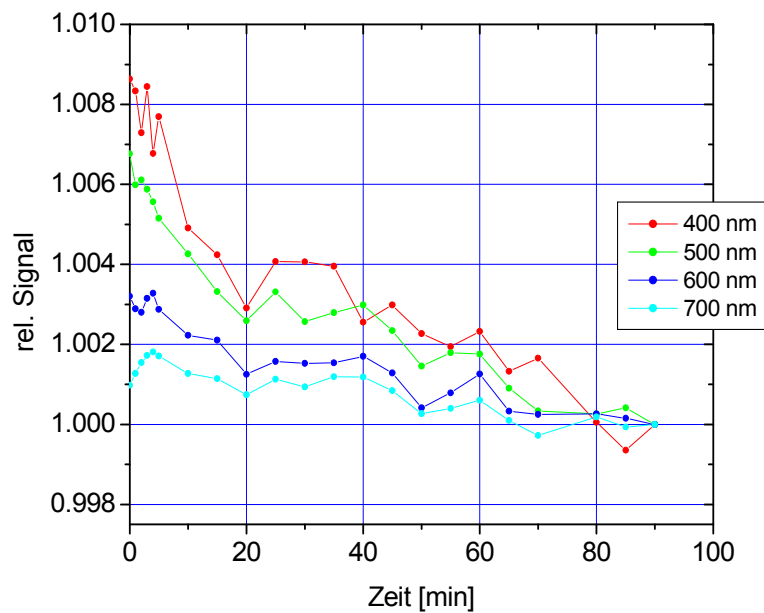


Abbildung 4.21: Temperaturdrift des MCS_UVVis nach dem Einschalten.

Dies gilt ebenso für das MCS-NIR Modul, das PGS-NIR Modul jedoch ist aufgrund der thermischen Stabilisierung (peltiergeregelt) deutlich stabiler und zeigt keine Drift in der Aufwärmphase.

4.3.6 Der „Cosine Response“

Die Einkopplungsoptik (s. Abbildung 4.13 b)) des Spektralradiometers sollte möglichst winkelunabhängig die auftreffende Strahlung in die Lichtleiter reflektieren. Die Abweichung von der lambertschen Eigenschaft ist bei der untersuchten Optik im Bereich von bis zu 40° vernachlässigbar (vgl. Abbildung 4.22). Bei Sonnensimulatoren trifft die Strahlung meist mit einem Randwinkel von $< 10^\circ$ auf die Probe. Bei 300 nm ist aufgrund der geringen Intensität der verwendeten FEL-Lampe die Reproduzierbarkeit nicht ausreichend.

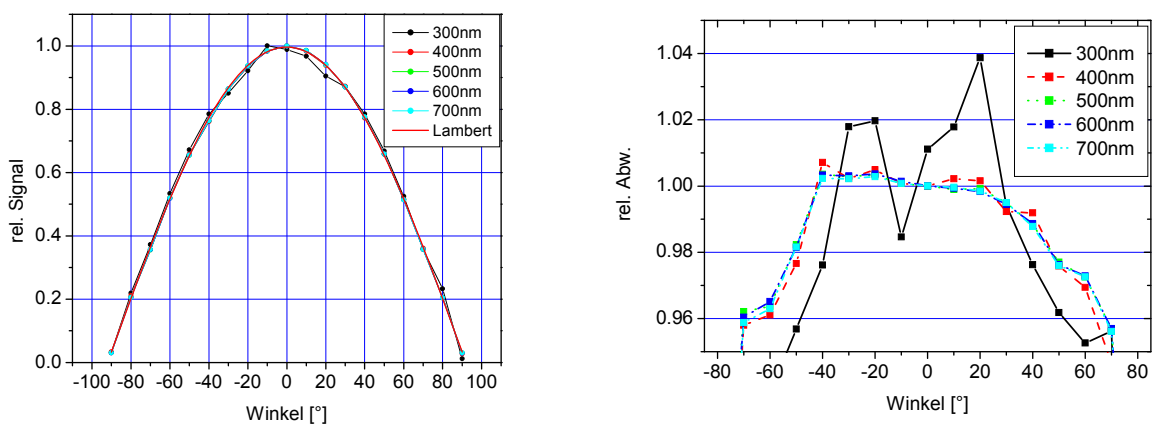


Abbildung 4.22: Winkelabhängigkeit der Einkopplungsoptik, bis mindestens 40° wird eine sehr gute cos-Eigenschaft der Optik erreicht.

4.3.7 Streulicht

Bei der Verwendung von Einfachmonochromatoren ist der zu erwartende Beitrag des Streulichtes nicht vernachlässigbar. Bei Monochromatoren hoher Qualität können Werte von 10^{-4} - 10^{-5} erreicht werden [40]. Streulicht entsteht durch:

- Reflexionen am Detektor
- Imperfektionen am Gitter
- Reflexion von Randbereichen (nicht Detektor und Gitter)
- Streuung von Randbereichen beleuchtet durch Überstrahlung der Gitter

Zur Ermittlung des Streulichtanteils wird die Strahlung eines Lasers vermessen. Die Verbreiterung der Laserlinie außerhalb der Halbwertsbreite des Spektralradiometers wird durch die Streuung verursacht.

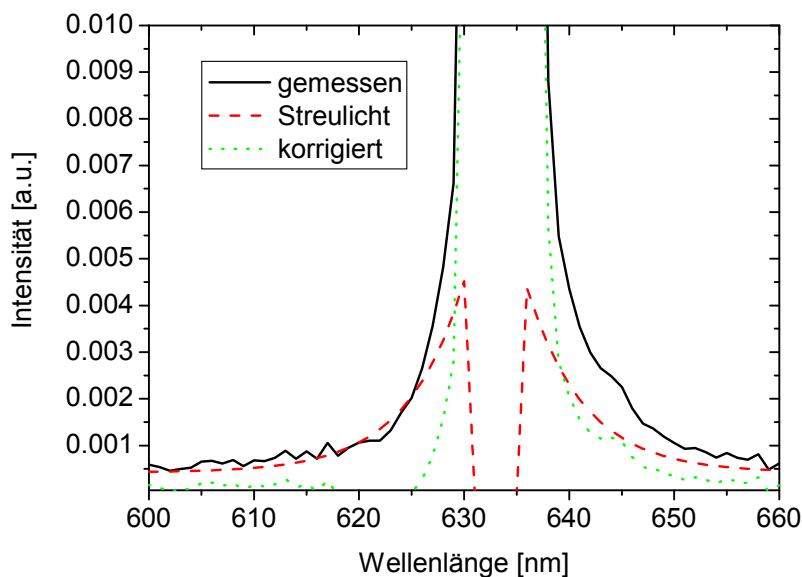


Abbildung 4.23: Messung eines 632.9 nm Laserpeaks mit dem MCS-UVVis. Das Streulicht wurde mit einem exponentiellen Modell außerhalb der Interband Region (2.4 nm) und einem konstanten diffusen Anteil beschrieben. Die Asymmetrie der Messkurve (Überhöhung der rechten Flanke) ist vermutlich auf einen Gitterfehler (Imperfektion) zurückzuführen.

Mit einem HeNe-Laser wurden die Streulichteigenschaften (s. Abbildung 4.23 und Abbildung 4.24) beim MCS-UVVis untersucht. Dabei wurde der diffuse Anteil welcher als „Untergrund“ alle Wellenlängen gleichmäßig bedeckt und der „haze“, welcher nur die benachbarten Wellenlängen exponentiell abfallend überdeckt, bestimmt.

Wird diese systematische Bestimmung des Streulichtes für verschiedene Wellenlängen durchgeführt, kann diese Information nach Zong [42] zur Streulichtkorrektur genutzt werden. Für die systematische Analyse der Streulichteigenschaften wird die spektrale Antwort des Spektrometers bei Verwendung einer monochromatischen Strahlungsquelle analysiert. Der Bereich der Bandbreite, in dem die Strahlungsquelle emittiert, wird im Weiteren mit BB bezeichnet. Jegliches Messsignal außerhalb der Bandbreite der Strahlungsquelle wird als Streulicht interpretiert. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass ein Fehler in der Dunkelstromkorrektur ebenfalls Signal außerhalb der Bandbreite der Strahlungsquelle erzeugen kann. Nun wird die Line-Spread-Function (LSF) für jedes Pixel j mit Streulichtbeiträgen aus Wellenlängenbereichen der Pixel i definiert als $f_{LSF,i,j}$. Damit lässt sich die Streulichtverteilungsfunktion für das Messsystem als Matrix formulieren:

$$d_{i,j} = \frac{f_{LSF,i,j}}{\sum_{i \in BB} f_{LSF,i,j}} \quad \text{für } i \notin BB \quad (4.10)$$

$$d_{i,j} = 0 \quad \text{für } i \in BB$$

Diese Matrix gibt für jedes Pixel i an, wie viel Streulicht der zu Pixel j zugeordneten Wellenlänge an Pixel i gemessen wird. Das gesamte Streulicht an Pixel i wird nun durch Gewichtung aller Pixel j mit dem tatsächlich eingestrahlten Spektrum E_j und der anschließend ausgeführten Summe über alle j ermittelt:

$$SL_i = \sum_j d_{i,j} E_j \quad (4.11)$$

Da davon ausgegangen werden kann, dass der Streulichtanteil klein gegenüber dem Messsignal ist, wird in Gleichung (4.17) das tatsächlich eingestrahlte Spektrum durch das gemessene $E_{j,meas} \approx E_j$ ersetzt.

Diese Beschreibung berücksichtigt nur Streulicht aus dem Empfindlichkeitsbereich des Spektrometers, welcher geringer sein kann, als der Empfindlichkeitsbereich des eingesetzten Detektors. Eine vollständige Beschreibung des Messsignals müsste die Strahlung innerhalb der Bandbreite der Strahlungsquelle $E_{i,BB}$, das Streulicht aus den anderen Wellenlängenbereichen des Spektrometers SL_i und das Streulicht aus Wellenlängenbereichen außerhalb des Wellenlängenbereiches des Messsystems SL_{ext} enthalten. Damit wird das gesamte gemessene Signal wie folgt beschrieben:

$$S_{i,meas} = E_{i,BB} + SL_i + SL_{ext} = E_{i,BB} + \sum_j d_{i,j} E_{j,BB} + SL_{ext} \quad (4.12)$$

Vernachlässigt man SL_{ext} , so kann man Gleichung (4.12) in Matrixform wie folgt wiedergeben:

$$\mathbf{S}_{i,meas} = \mathbf{S}_{BB} + \mathbf{D}\mathbf{S}_{BB} \quad (4.13)$$

Mit dem eingestrahlten Spektrum \mathbf{S}_{BB} . Man kann Gleichung 1.13 auch mit der Einheitsmatrix \mathbf{I} schreiben als:

$$\mathbf{S}_{i,meas} = [\mathbf{I} + \mathbf{D}]\mathbf{S}_{BB} \quad (4.14)$$

und damit

$$[\mathbf{I} + \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{S}_{i,meas} = \mathbf{S}_{BB}$$

Bestimmt man nun die Inverse $[\mathbf{I} + \mathbf{D}]^{-1} = \mathbf{A}$ so kann man mit einer Matrixmultiplikation das streulichtkorrigierte Spektrum aus dem gemessenen berechnen:

$$\mathbf{S}_{BB} = [\mathbf{I} + \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{S}_{i,meas} = \mathbf{A}\mathbf{S}_{i,meas} \quad (4.15)$$

In diesen Untersuchungen wurden die Streulichteigenschaften an einem Spektrometermodul mit einem HeNe-Laser exemplarisch untersucht. Es ist eine Wellenlängenabhängigkeit zu erwarten [42, 43]. Eine vollständige Erfassung des Streulichtes zur Korrektur kann mit einem durchstimmbaren Lasersystem realisiert werden. Da ein solches System für diese Arbeit nicht zur Verfügung stand, wurden die Messungen mit dem HeNe-Laser bei 632 nm auf alle Wellenlängen verallgemeinert und zur Abschätzung eines zusätzlichen Fehlers verwendet. Das Ergebnis einer solchen Abschätzung für die Messung eines Xenonlampen Sonnensimulators gegen ein Bestrahlungsstärkenormal ist in Abbildung 4.24 dargestellt.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

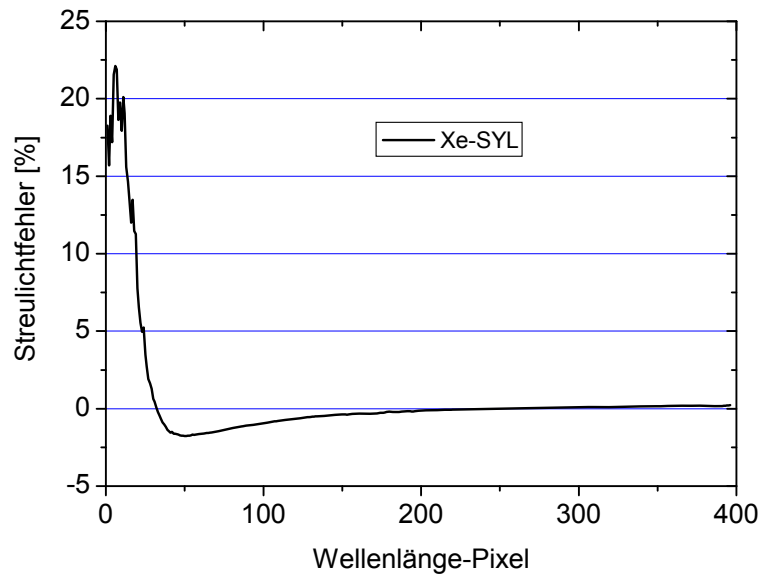


Abbildung 4.24: Berechnung des verbleibenden Streulichtfehlers des MCS UVVis Spektrometers unter Berücksichtigung der Korrelation der Fehler bei Kalibrierung des Gerätes mit einer Sylvania Kalibrierlampe (Bestrahlungsstärkenormal) und der Messung eines Xe-Lampen Sonnensimulators.

Hierbei ist für das MCS-UVVis noch nicht berücksichtigt, dass Wellenlängen oberhalb 700 nm ebenfalls Streulicht im Spektrometer verursachen und vom Sensorarray detektiert werden können. Der Streulichtfehler wirkt sich vorwiegend in den Wellenlängenbereichen aus, in denen sich die Fehler der Kalibriermessung und der Messung des Sonnensimulators nicht kompensieren (vgl. Abbildung 4.2).

Weitere Untersuchungen zeigen, dass auch Gitterfehler beim vorhandenen System zum Streulicht beitragen. Die Untersuchung mit einem 804 nm Halbleiterlaser (s. Abbildung 4.25) lässt zuerst eine Nebenmode des Lasers bei 1050 nm vermuten.

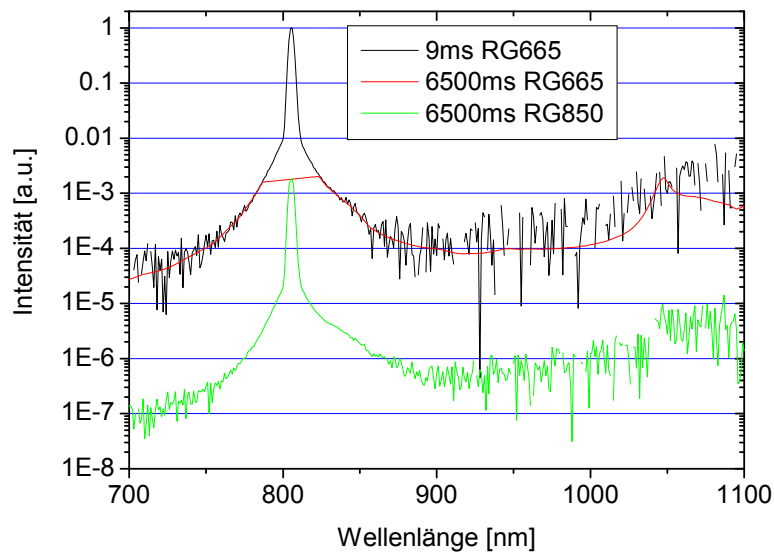


Abbildung 4.25: Das RG850-Filter reduziert Peak und Streulicht um 10^{-3} , ebenso die Intensität der Nebenmode. Daher muss ein Gitterfehler vorliegen (kein Nebenpeak des Lasers; Graph normiert).

Eine Messung wurde mit niedriger Integrationszeit (9 ms) bei Vollaussteuerung des Spektralradiometers durchgeführt. Eine weitere Messung mit langer Integrationszeit (6500 ms), welche im Bereich um 770 nm auf die normierte Kurve bei Vollaussteuerung skaliert wurde. Wird anstatt des RG665 ein RG850 eingesetzt, reduziert sich sowohl der Peak als auch das diffuse Streulicht (alle Wellenlängen) um 10^{-3} . Der Nebenpeak bei 1050 nm ist nicht mehr erkennbar. Daraus lässt sich schließen, dass es sich nicht um eine Nebenmode sondern um eine Streuung im Spektrometer, einen Gitterfehler handelt.

4.3.8 Unsicherheit durch Kombinieren der Teilspektren

Das Spektrometersystem besteht aus 3 einzelnen Spektrometerkassetten der Firma Carl Zeiss. Die Wellenlängenbereiche der einzelnen Spektrometerkassetten überlappen sich unterschiedlich stark (vgl. Tabelle 4.1). Die Überlappungsbereiche sind von unterschiedlichen Messunsicherheiten betroffen. Im Bereich 695-700 nm handelt es sich jeweils um ein Silicium Diodenarray S3904-512 von Hamamatsu. Die Reproduzierbarkeit ist aufgrund der hohen Signalstärke in diesem Bereich sehr hoch, da dies der mittlere Bereich der spektralen Empfindlichkeit des Siliciumsensors ist. Sensor und Messelektronikeigenschaften können als identisch angenommen werden, da sich die Messkassetten im Wesentlichen durch das eingesetzte dispersive Gitter unterscheiden. Die Transmission des zusätzlich verwendeten RG-Kantenfilter ist im Bereich der Kante temperaturabhängig, daher wurde der zuerst eingesetzte RG 665 durch einen RG 645 ersetzt. Damit kann das Zusammenfügen der Spektren im Bereich 695-700 nm als unkritisch angesehen werden. Unterschiede zwischen den kalibrierten Messsignalen in diesem Bereich sind im Wesentlichen auf inhomogene Ausleuchtung der Einkopplungsoptik und evtl. auf die Reproduzierbarkeit der Lichtleitermontage zurückzuführen. Diese Unterschiede werden durch Skalieren der Teilspektren eliminiert:

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

$$E(\lambda)_{UVVis-NIR} = E(\lambda)_{UVVis} + \frac{E(\lambda)_{NIR} \int_{695}^{700} E(\lambda)_{UVVis}}{\int_{695}^{700} E(\lambda)_{NIR}} \quad (4.16)$$

Im Bereich 950-1100 nm hat das MCS-NIR gegen 0 abnehmende Empfindlichkeit, damit nimmt gleichzeitig das Rauschen-zu-Signal Verhältnis sowie die Einflüsse von Dunkelstromdrifts zu. Der InGaAs Detektor hat ebenfalls abnehmende Empfindlichkeit, jedoch ein deutlich besseres Signal-zu-Rauschverhältnis. Die optische Auflösung der Detektoren ist unterschiedlich (s. Tabelle 4.3), so das man beim Zusammenfügen möglichst viel aus dem Bereich des MCS-NIR mit der besseren Auflösung ins gesamte Spektrum übernehmen möchte.

$$E(\lambda)_{UVVis-NIR-PGSNIR} = E(\lambda)_{UVVis-NIR} + \frac{E(\lambda)_{PGSNIR} \int_{xxx}^{xxx} E(\lambda)_{UVVis-NIR}}{\int_{xxx}^{xxx} E(\lambda)_{PGSNIR}} \quad (4.17)$$

4.3.9 Zusammenfassung der Messunsicherheiten

Die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge beim untersuchten Messsystem sind:

- Bestrahlungsstärkenormal (mit Übertragungskette)
- Streulicht
- Langzeitreproduzierbarkeit,
- Linearität
- Optische Auflösung (bei integralen Größen (z.B. MM) kleinerer Einfluss)

Diese Messunsicherheitsbetrachtungen sind an einen Photodiodenarrayspektralradiometer (PDA) durchgeführt worden. Des Weiteren stand zum Vergleich ein Doppelmonochromatorsystem und ein neu angeschafftes bisher wenig untersuchtes CCD-Array-Spektralradiometersystem zur Verfügung. Eine erste Vergleichsmessung (s. Abbildung 4.26) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den drei Spektralradiometersystemen. Vorwiegend in den schmalen Xe-Peaks zeigen sich Unterschiede, welche auf die optische Auflösung der Messsysteme zurückzuführen sind.

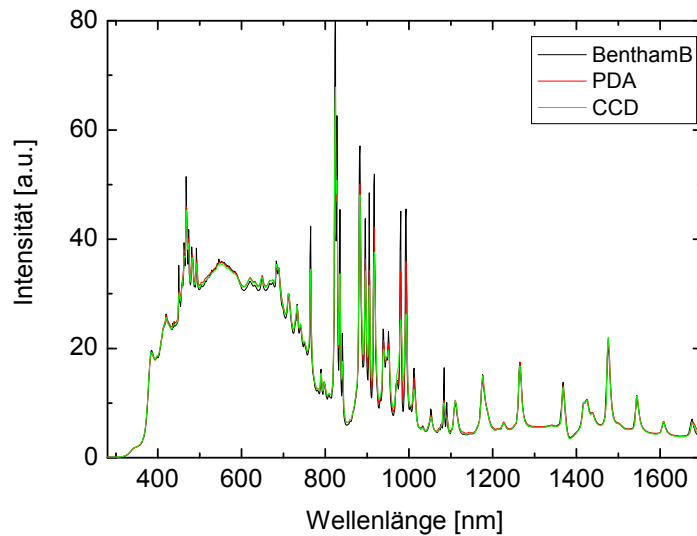


Abbildung 4.26: Vergleichsmessung am XAT Xenonlampen Sonnensimulator mit 3 verschiedenen Spektralradiometern. Bentham Doppelmonochromator, Photodiodenarray (PDA) und CCD.

Es wurden weitere Beiträge untersucht, welche in die gesamte Messunsicherheit eingehen. Diese sind in folgender Modellgleichung zusammengefasst:

$$E_U(\lambda) = E_{Std}(\lambda) \frac{S_U - S_{U,d}}{S_{Std} - S_{Std,d}} \bullet k_{WL} k_{Bb} k_{NL} k_{dCDrift} k_{TDriftPDA} k_{CR} k_{St} \quad (4.18)$$

mit den Faktoren k_x und deren Unsicherheiten:

- u_{WL} : Messunsicherheit Wellenlängenkalibrierung
- u_{Bb} : Messunsicherheit durch Bandbreite/Auflösung
- u_{NL} : Messunsicherheit durch Nichtlinearität
- $u_{dCDrift}$: Messunsicherheit durch Drift des Dunkelstromes
- $u_{TDriftPDA}$: Messunsicherheit durch Temperaturdrift der Diodenzeile
- u_{CR} : Messunsicherheit durch Abweichung von Lambert-Eigenschaften der Einkoppeloptik
- u_{St} : Streulichtfehler

Typische Messunsicherheiten lassen sich für bestimmte Spektralverteilungen berechnen, wie in Abbildung 4.27 dargestellt.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

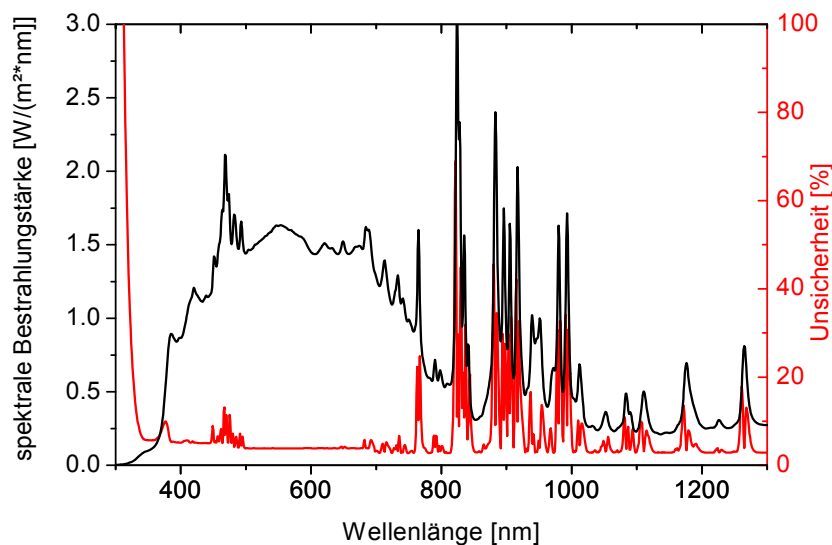


Abbildung 4.27: Spektrale Verteilung eines Xenonlampen Sonnensimulators mit wellenlängenabhängigen Messunsicherheiten.

4.3.10 Verbesserungspotential

Die folgenden weiterführenden Arbeiten lassen weitere Verbesserungen erwarten:

Die genauere Bestimmung der Streulichteigenschaften und die Implementierung einer Korrektur bietet in Zukunft ein hohes Potential zur Verbesserung der Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke. Ein durchstimmbares Lasersystem bietet hierfür eine wesentliche Grundlage. Auch die Untersuchung des Einflusses von Streulicht aus einem Wellenlängenbereich oberhalb 700 nm wäre beim MCSUVVis Sensor eine sinnvolle Ergänzung.

Beim PGSNIR Sensor müsste eine Möglichkeit zur Wellenlängenkalibrierung geschaffen werden.

Die Verwendung des Doppelmonochromatorsystems wäre bei Dauerlichtsimulatoren ebenfalls denkbar, jedoch müssen die Detailuntersuchungen zuerst ausgewertet und analysiert werden.

4.4 Bewertung von Einstrahlungsspektren nach IEC 60904-9

Die gemessenen spektralen Verteilungen werden meist zur rechnerischen Bestimmung integraler Größen verwendet:

- zur Berechnung des spektralen Mismatch (s. Abschnitt 3.2)
- zur Bestimmung des Kurzschlussstromes bei bekannter spektraler Empfindlichkeit (vgl. Gl. (3.30))
- zur Bewertung der Spektren selbst nach IEC 60904-9 [44].

Die folgende Analyse geht auf Punkt 3 ein. Nach IEC 60904-9 werden die Verhältnisse der integralen Werte der gemessenen spektralen Verteilung zum jeweiligen Normspektrum in festgelegten Wellenlängenbereichen ermittelt. Da hierbei nur der relative Verlauf bewertet werden soll, wird auf die Gesamtintensität des jeweiligen Spektrums normiert (s. Gl. (4.19)).

$$V_i = \frac{\int_{400nm}^{1100nm} E_{SIM}(\lambda) d\lambda}{\int_{400nm}^{1100nm} E_{REF}(\lambda) d\lambda} \quad (4.19)$$

Betrachtet man die Stromverteilung einer Siliciumsolarzelle bzgl. AM1.5g oder einer spektralen Verteilung eines Xenonlampen Sonnensimulators, so erscheint die Aufteilung der Integrationsintervalle nach IEC 60904-9 zumindest für Siliciumsolarzellen sinnvoll.

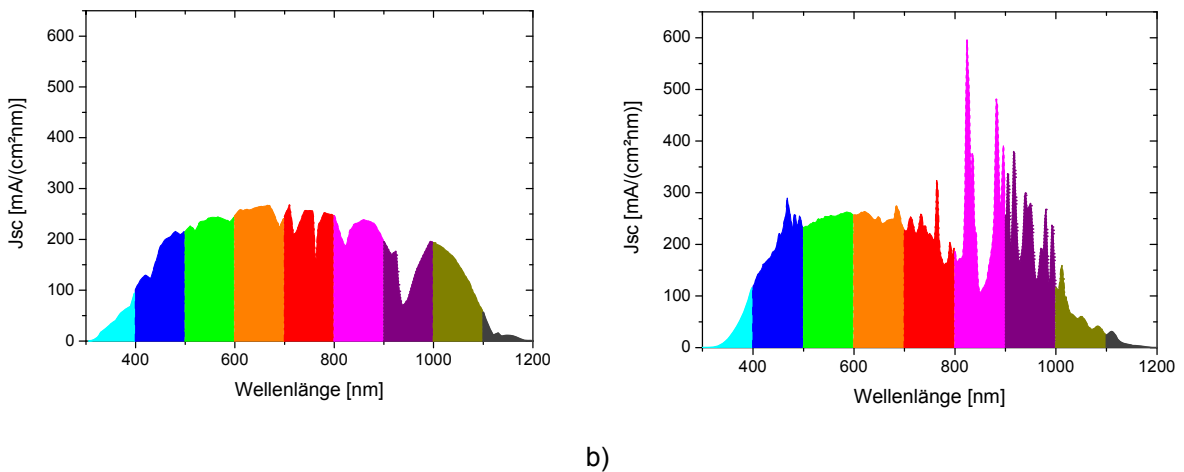


Abbildung 4.28: Spektrale Stromdichteverteilung einer Silicium Solarzelle bzgl. a) AM1.5g und b) einem Xe-Sonnensimulator Spektrum.

AM1.5G

Wellenlängenbereich [nm]	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100	1100-1200
Stromanteil	2.34%	11.63%	16.15%	17.54%	16.42%	15.29%	9.95%	9.82%	0.87%
	85.16%								
	96.79%								

Xe-Sonnensimulator

Wellenlängenbereich [nm]	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100	1100-1200
Stromanteil	1.97%	13.48%	16.70%	16.82%	14.49%	16.73%	14.83%	4.36%	0.62%
	83.93%								
	97.41%								

Tabelle 4.4: Stromanteile einer Siliciumsolarzelle in 100 nm Bereichen eines AM 1.5g und einer Xe-Sonnensimulator Spektralverteilung (vgl. Abbildung 4.28).

In den Bereichen 400 und 900 nm produziert eine Siliciumsolarzelle jeweils zwischen 10 und 20 % ihres Gesamtstromes. Der Bereich 900 – 1000 nm liegt nur knapp darunter und summiert mit dem Anteil des Bereiches 1000 – 1100 nm, wie in der Norm vorgeschrieben, wird ein Wert knapp unter 20 % erreicht.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

Eine Aufteilung in zwei Bereiche erscheint hier ebenfalls sinnvoll, jedoch würden dann die meisten Xenonlampen Sonnensimulatoren schlechter klassifiziert werden (s. Tabelle 4.4).

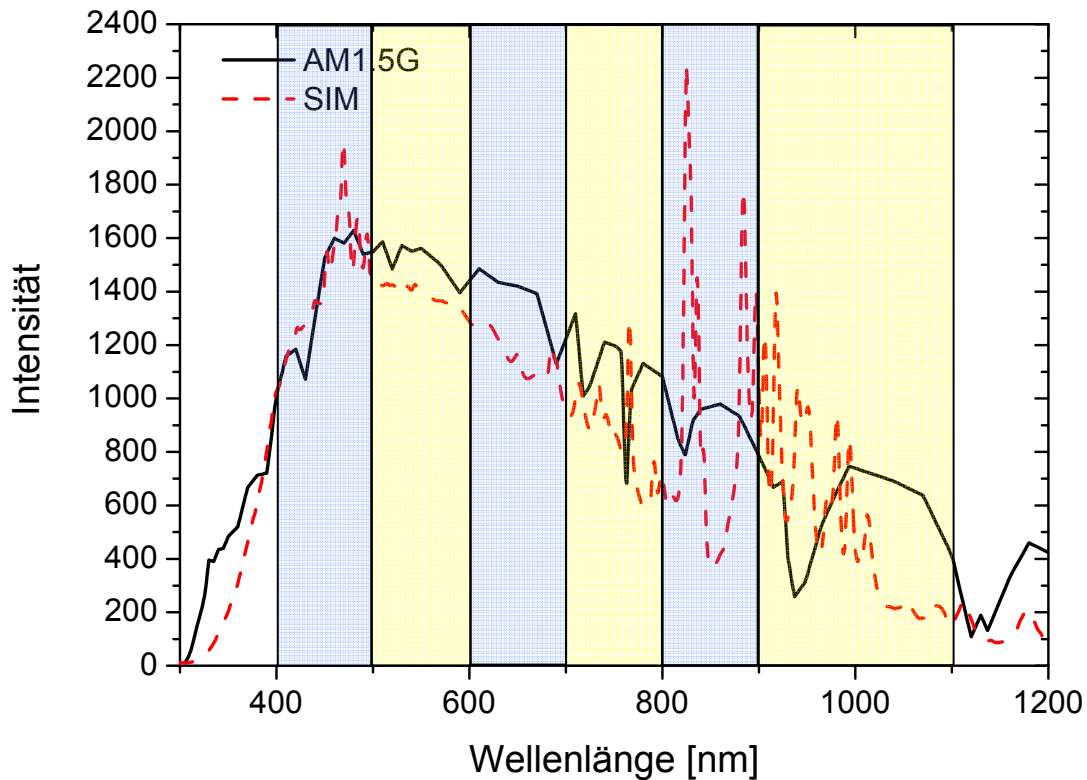


Abbildung 4.29: Spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke eines Xenonlampen Sonnensimulators im Vergleich zum Normspektrum AM1.5g. die farbigen Bereiche entsprechen den bei der Klassifizierung nach IEC 60904-9 vorgeschriebenen Bereichen.

Die Absorptionsbande im terrestrischen Normspektrum bei 940 nm liegt im Bereich der Xenon Entladungslinien. Werden diese mittels Filterung stark reduziert, ist in der Praxis meist auch mindestens einer der Nachbarbereiche 800 – 900 nm oder 1000 -1100 nm betroffen. Da in diesen Bereichen zu geringe Intensitäten vorliegen, wird die Gesamtwirkung der Spektralverteilung meist verschlechtert. Weiterentwicklungen bei Filterherstellern sollten es ermöglichen dieses Problem zu lösen, dafür wäre eine Überarbeitung dieser Norm jedoch hilfreich [45].

Klasse A	Klasse B	Klasse C
0.75-1.25	0.6-1.4	0.4-2.0

Tabelle 4.5: Klassifikation nach IEC 60904-9. Die Werte der V_i 's nach Gleichung (4.19) aller Wellenlängenbereiche müssen innerhalb der angegebenen Bereiche liegen.

Eine Einteilung in mehr als drei Klassen mit feinerer Abstufung erscheint zwischenzeitlich ebenfalls erforderlich, da sowohl Hersteller als auch laborinterne Verbesserungsarbeiten Spektren mit $0.9 < V_i < 1.1$ ermöglichen.

Grundlage für Verbesserungen der spektralen Verteilung und ihrer Bewertung ist die rückführbare Bestimmung der spektralen Verteilung der Bestrahlungsstärke (s Abschnitt 4). Die Berücksichtigung der wellenlängenabhängigen Messunsicherheiten bei integralen Größen ist nicht trivial. Nach der Standardmethode zur Fortpflanzung der Messunsicherheiten müssten für alle Wellenlängen die

Korrelationen zu allen anderen Wellenlängen berücksichtigt werden (s. Gl. (4.20)). Bei einem Bereich von 1000 nm in 1 nm Schritten wären dies 1000x1000 Korrelationskoeffizienten.

$$u_g = \left\{ \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \right\}^{1/2} \quad (4.20)$$

$f(x)$ stellt die wellenlängenabhängige Funktion (also hier die spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke) mit den Messunsicherheiten $u(x)$ der jeweiligen Funktionswerte (Intensitätswerte) dar.

In Tabelle 4.6 sind drei Variationen von Berechnungen zusammengestellt. Werden die Korrelationen nicht berücksichtigt, so wird mit der quadratischen Addition aller Messunsicherheiten eine sehr geringe Gesamtmessunsicherheit der Integralsumme ermittelt (s. Tabelle 4.6 i)). Mit der Annahme einer (quasi)konstanten Messunsicherheit im betrachteten Wellenlängenbereich könnte (als Näherung) der Mittelwert der relativen Messunsicherheiten als Messunsicherheit für die Integralsumme verwendet werden (s. Tabelle 4.6 ii)). Hierbei sind wiederum keine Korrelationen berücksichtigt, da jedoch Messunsicherheiten mit identischem Ursprung von Zähler und Nenner in Gl. (4.19) sich wegen der Integrale nicht herauskürzen, fallen die ermittelten Gesamtmessunsicherheiten zu groß aus.

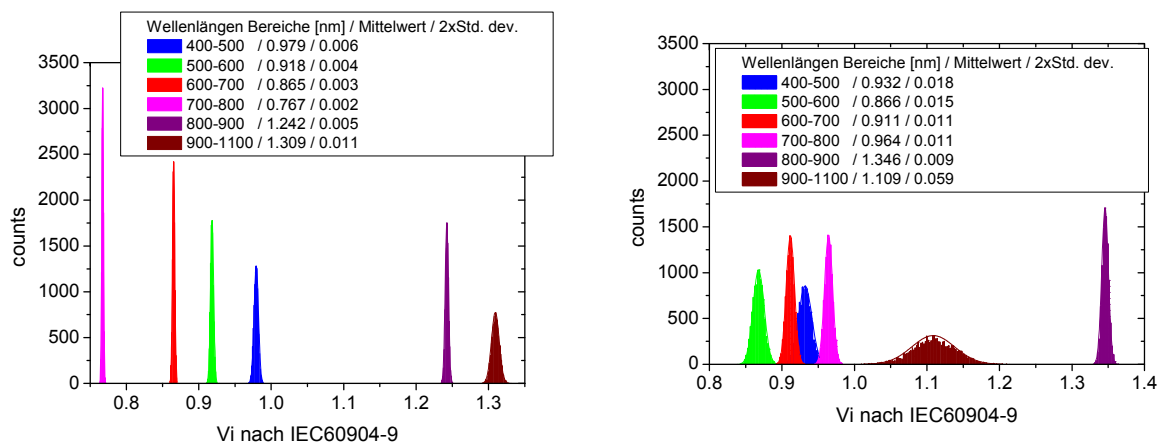
Die hier verwendete Methode zur Bestimmung der Messunsicherheiten der einzelnen V_i 's verwendet Zufallskurven (Random Walk) zur Berücksichtigung von Korrelationen benachbarter Wellenlängen und ist in Abschnitt 6.2.1 näher beschrieben.

Wellenlängenbereich [nm]	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1100	
$V_i = \text{Ist/Soll}$	0.932	0.868	0.911	0.964	1.346	1.109	
i) +/- V_i	0.007	0.006	0.007	0.007	0.013	0.025	o. Berücksichtigung v. Korrelationen
ii) +/- V_i	0.050	0.036	0.052	0.050	0.185	0.887	Mittelwerte rel. Unsicherheiten
iii) +/- V_i	0.018	0.015	0.011	0.011	0.009	0.059	Monte Carlo (Random Walk)

Tabelle 4.6: Beispielberechnung der Klassifizierung nach IEC 60904-9 für eine typische Spektralverteilung. Die Bestimmung der Messunsicherheiten wurde mit drei verschiedenen Methoden durchgeführt.

Die Messunsicherheiten werden aus der Standardabweichung einer Verteilung von V_i -Werte ermittelt, die wiederum aus der 10000-fachen Berechnung solcher V_i -Werte mit variierten Eingangsgrößen entstehen. Die Ergebnisse solcher Berechnungen sind in Abbildung 4.30 dargestellt.

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke



a)

b)

Abbildung 4.30: Mit der Monte Carlo Methode wurden jeweils 10000 V_i -Werte bestimmt, um deren Messunsicherheiten zu ermitteln. Die berücksichtigten Messunsicherheiten sind bei Messung a) geringer aufgrund des höheren Messsignals im Vergleich zu Messung b).

Wellenlängenbereiche mit höherer Messunsicherheit ergeben eine breitere (gauß'sche) Verteilung. In Abbildung 4.30 b) sind aufgrund eines geringen Messsignals die Messunsicherheiten deutlich größer als bei Abbildung 4.30 a).

Mit dieser Methode können die gemessenen spektralen Verteilungen der Bestrahlungsstärke nach IEC 60904-9 erst vollständig beurteilt werden, da die Messunsicherheiten entscheidend für die Stichhaltigkeit der Klassifizierung sind.

Die Bedeutung und Aussagekraft der Klassifizierung der Spektren nach IEC und deren Auswirkung für die Kalibrierung von Solarzellen wird andererseits nur bedingt durch diese Klassifizierung wiedergegeben, eine detaillierte Analyse ist in Abschnitt 6.2.3 beispielhaft durchgeführt. Eine genaue Betrachtung für sehr gut angepasste spektrale Verteilungen ist in Abschnitt 6.2.5 ausgeführt. Daher sollte die Norm selbst an die veränderten Möglichkeiten und gestiegenen Anforderungen angepasst werden.

4.5 Messung von Xenonspektren im Bereich der Emissionslinien

Bei der Messung von Xenon-Entladungslampen stellt sich die Frage nach der tatsächlichen Breite der gemessenen Spektrallinien. In Abschnitt 6.2.4 wird hierzu im Weiteren erläutert, welchen Einfluss die Auflösung des Messinstrumentes für die Messung der spektralen Verteilung der Bestrahlungsstärke auf die Berechnung des Spektralkorrekturfaktors (s. Gleichung (3.32)) hat.

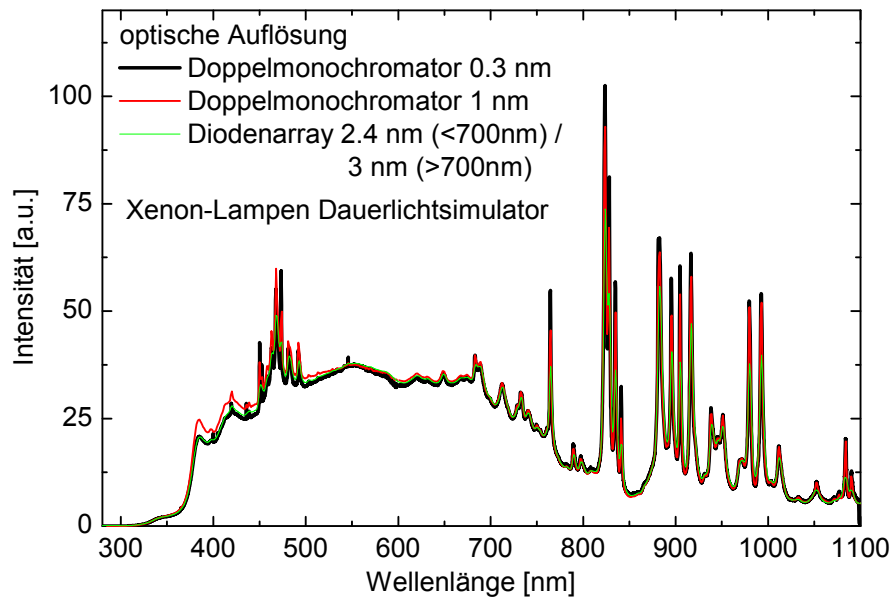


Abbildung 4.31: Spektrale Verteilungen der Bestrahlungsstärke eines Xenonlampen-Sonnensimulators mit einem Doppelmonochromator mit einer Auflösung von 0.3 nm, 1 nm und einem Diodenarrayspektrometerelement mit 2.4-3 nm optischer Auflösung. Die Abweichungen unterhalb 450 nm sind auf die Nichtlinearität des Photomultipliers des Doppelmonochromatorsystems zurückzuführen.

Da Spektrallinien die Folge der Emission eines Photons aufgrund eines sich ändernden Elektronenzustandes sind, kann das emittierte Frequenzspektrum mittels Fouriertransformation aus einer gedämpften harmonischen Schwingung mit der Zeitkonstante τ berechnet werden. Dies ergibt eine Lorenzfunktion mit der Halbwertsbreite $\Delta\omega$ [46]. Daher ist die natürliche Linienbreite $2\Delta\omega$ die Folge der Lebensdauer des emittierenden Elektronenzustandes mit:

$$2\Delta\omega = \frac{1}{\tau} \quad (4.21)$$

Die Umrechnung von Frequenz in Wellenlänge erfolgt nach der Beziehung für den Photonenimpuls:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (4.22)$$

$$\Leftrightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$$

4 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

Damit ergibt sich zur Umrechnung der Halbwertbreite aus (4.22):

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial \lambda} \lambda &= \frac{\partial}{\partial \lambda} \frac{c}{\nu} \\ \Leftrightarrow \\ \frac{\partial \lambda}{\partial \lambda} &= -\frac{c}{\nu^2} \frac{\partial \nu}{\partial \lambda} \\ \Rightarrow \\ \Delta \lambda &= -\frac{c}{\nu^2} \Delta \nu\end{aligned}\tag{4.23}$$

Lebensdauern elektronischer Zustände in völlig isolierten Atomen, aus welchen Elektronen Photonen im sichtbaren Bereich emittieren, liegen bei 10^{-7} - 10^{-8} s [46]. Daher werden natürliche Linienbreiten im Bereich von 10^{-5} - 10^{-6} nm erreicht.

Diese natürlichen Linienbreiten sind im Allgemeinen von linienverbreiternden Mechanismen überdeckt. In Gasen sind hier die Druckverbreiterung und die Dopplerverbreiterung zu nennen. Aufgrund des Gasdruckes werden die Emissionsprozesse durch Stöße der Gasmoleküle induziert. Die Folge sind deutlich geringere Lebensdauern der angeregten Zustände. Der Betriebsdruck von XBO-Lampen liegt bei 20-35 bar [47].

Mit der gaskinetischen Stoßzeit t bzw. der mittleren thermischen Geschwindigkeit v , der Teilchenzahldichte n und dem Stoßquerschnitt A ergibt sich für die Druck- oder Stoßverbreiterung [48]:

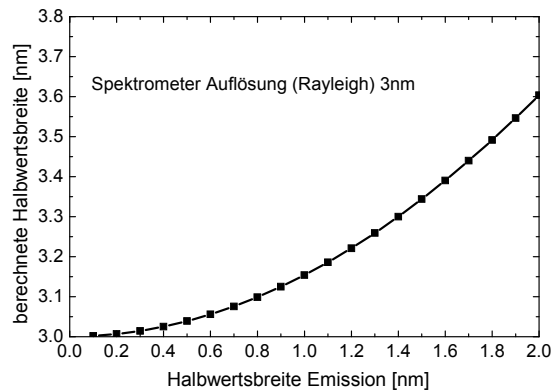
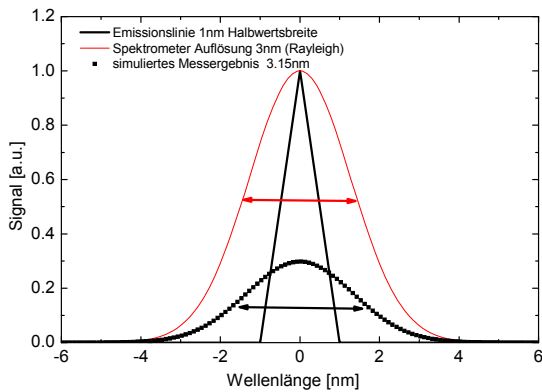
$$\Delta \omega_s \approx \frac{1}{t} \approx nAv\tag{4.24}$$

Die Stoßverbreiterung spielt vor allem bei der Emission aus Sternatmosphären eine Rolle.

Die Dopplerverbreiterung wird durch die Bewegung der emittierenden Gasmoleküle in oder gegen die Emissionsrichtung des Photons verursacht und hängt daher ebenfalls von der Geschwindigkeit und damit von der thermischen Energie der Moleküle ab [46]:

$$\Delta \nu_D = 7.162 \cdot 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}}\tag{4.25}$$

Mit dem Molekulargewicht $M_{Xe} = 134$ ergeben sich typische Linienbreiten von 0.056 nm bei der Temperatur von 10000 K im Bogen [47] einer Xe-Kurzbogenlampe. Die so verbreiterten Linien werden durch die optische Auflösung des Gitterspektrometers bei der Messung als nochmals breitere Linien abgebildet. In Abbildung 4.32 a) wird die emittierte Linie vereinfacht als Dreiecksfunktion mit einer Halbwertsbreite von 1 nm dargestellt. Die optische Auflösung des Gitterspektrometers wird mit 3 nm als Gauß-Funktion modelliert und die daraus resultierende Gauß-Funktion mit einer Halbwertsbreite (FWHM) von 3.15 nm berechnet. Diese Berechnungen sind in Abbildung 4.32 b) für Linienbreiten von 0.1 nm bis 2 nm dargestellt. Aufgrund der Symmetrie kann die Berechnung in Abbildung 4.32 b) auch umgekehrt gedeutet werden: Emissionslinie mit 3 nm Halbwertsbreite gemessen mit einem Spektrometer mit variabler Auflösung von 0.1-2 nm.

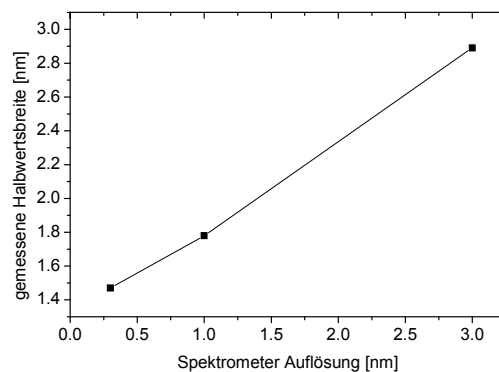
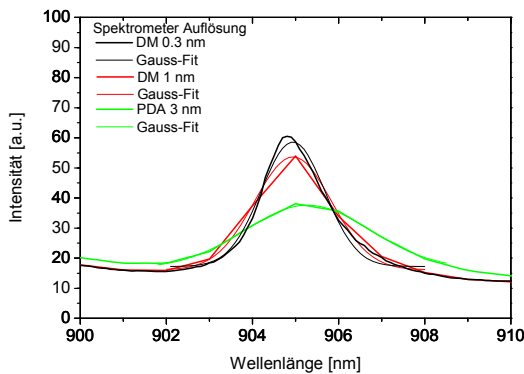


a)

b)

Abbildung 4.32: Verbreiterung einer 1 nm breiten Spektrallinie durch die optische Auflösung des Gitterspektrometers von 3 nm auf 3.15 nm. b) Resultierende Linienbreite der Messung einer Spektrallinie in Abhängigkeit der tatsächlichen Linienbreite.

Spektrallinien liegen häufig sehr eng beieinander liegen, lassen sich daher kaum getrennt auflösen. Aus der gemessenen Linienbreite kann daher im Regelfall nicht auf die tatsächliche Linienbreite geschlossen werden. Hierzu wurden Messungen mit stark verschiedenen Auflösungen der Messgeräte – wie in Abbildung 4.31 dargestellt – durchgeführt. Diese geben einen Eindruck der tatsächlichen Linienbreiten.



a)

b)

Abbildung 4.33: Messung der Xenon Entladungslinien derselben spektralen Verteilung mit drei unterschiedlichen Auflösungen. b) Ein Multi-Peak-Fit der Messung mit 0.3 nm Auflösung ermittelt für 905 nm eine Linienbreite von 2.48 nm.

Die 905 nm Linie stellt eine der schmäleren Linien im hier gemessenen Xenon Spektrum dar. Aus der Messung der 905 nm Linie mit dem hoch auflösenden Doppelmonochromatorsystem in Abbildung 4.33 b) und den Berechnungen in Abbildung 4.32 b) kann von einer tatsächlichen Linienbreite von ≈ 1.4 nm ausgegangen werden. Da das Arrayspektrometer (PDA) eine Auflösung von ca. 3 nm in diesem Wellenlängenbereich hat, wird die gesamte Entladungslinie ($2 \Delta\omega=6$ nm) mit ca. 7 Pixeln erfasst (Pixelabstand ≈ 0.8 nm).

Somit sind sowohl nach theoretischen Erwartungen wie experimentellen Ergebnissen die tatsächlichen Linienbreiten groß genug um hinreichend genau vom Spektrometersystem erfasst zu werden. Die erreichte Genauigkeit ist vor allem dann voll ausreichend, wenn man die Auswirkungen auf die weitere Verwendung der Daten (s. Abschnitt 6.2.4) berücksichtigt.

4.6 Zusammenfassung

In Kapitel 4 wurden die Eigenschaften und Detailuntersuchungen eines Diodenarrayspektralradiometers beschrieben. Dabei spielen die zeitlichen Abläufe bei der Messung von Blitzspektren eine wesentliche Rolle. Die untersuchten Eigenschaften erlauben eine Quantifizierung der einzelnen Einflüsse auf die Messunsicherheit einer spektralen Verteilung in einem Wellenlängenbereich von 280-1700 nm.

Speziell die Messung von Xenonlampen-Sonnensimulator Spektren standen dabei im Vordergrund, da diese mit Abstand am häufigsten zur Messung von Solarzellen und Modulen eingesetzt werden. Die Analysen beziehen sich sowohl auf den Messprozess, als auch auf die Auswertung der gemessenen Daten hinsichtlich der relevanten Normen. Hierzu wurde mittels einer Monte Carlo Methode die Messunsicherheiten von integralen Größen bestimmt. Des Weiteren werden weitere Möglichkeiten zur Optimierung dieser Messung aufgezeigt.

Eine Untersuchung zur Breite der emittierten Xenon-Entladungslinien zeigt, dass diese durch die optische Auflösung der Gitter nur noch unwesentlich verbreitert werden.

Hiermit liegt erstmals eine umfassende Beschreibung und Bewertung zahlreicher Einflüsse auf die Messung von Sonnensimulatorspektren vor. Damit sind rückführbare Messungen sowohl an Dauerlicht-, als auch an Blitzlichtsimulatoren möglich.

5 Analyse und Minimierung der Unsicherheit einer großflächigen Messung der spektralen Empfindlichkeit

Die spektrale Empfindlichkeit stellt an sich eine wichtige Größe zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Solarzelle dar. Ihre genaue Bestimmung ist - in Zusammenhang mit der spektralen Bestrahlungsstärke (Kapitel 4) bei der Messung des Kurzschlussstromes zur Korrektur des spektralen Mismatch (Abschnitt 6.2) – von großer Bedeutung. Zunächst wird eine in der Kalibrierung neu eingeführte Methode zur Bestimmung der Linearität der Solarzelle unter AM1.5g vorgestellt. Diese nutzt - im Gegensatz zum spektral aufgelösten Messverfahren der PTB in Braunschweig - ein integrales und damit vereinfachtes Messverfahren. Die Aussagefähigkeit als Teil eines Kalibrierverfahrens wird detailliert erörtert und dargestellt. Des Weiteren sind die wesentlichen Messunsicherheiten zusammengestellt und quantifiziert.

5.1 Einflussfaktoren und Unsicherheiten

5.1.1 Nichtlineare Solarzellen: Die WLR-Methode

Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, muss bei differentiellen Messmethoden die Nicht-Linearität der Solarzellen berücksichtigt werden. Die komplette DSR-Methode [29] ist hierbei sehr zeitaufwändig (vgl. Abschnitt 3.1), vor allem wenn man bedenkt, dass ausgeprägte Nicht-Linearitäten bei derzeitigen Standard-Industriesolarzellen eher selten auftreten.

Um ein rationelles Messverfahren zu ermöglichen, welches dennoch Nicht-Linearitäten ermittelt und berücksichtigt, wurde die WLR-Methode (White-Light-Response, [49]) als Kalibriermethode weiterentwickelt. Dazu müssen die Messunsicherheiten, speziell, welche durch die integrale Messmethode zusätzlich auftreten, bestimmt werden.

Bei diesem Messverfahren wird mittels einer breitbandigen sonnenähnlichen Spektralverteilung die Linearität des Kurzschlussstromes der Solarzelle ermittelt. Die in dieser Arbeit verwendete Strahlung ist nach IEC60904-9 der Klasse C zuzuordnen. Dabei wird die breitbandige Strahlung mittels Chopperrad moduliert, so dass mit zusätzlicher konstanter Biasbestrahlung eine differentielle Messung (vergleichbar mit dem DSR-Verfahren, s. Abschnitt 3.1) durchgeführt werden kann.

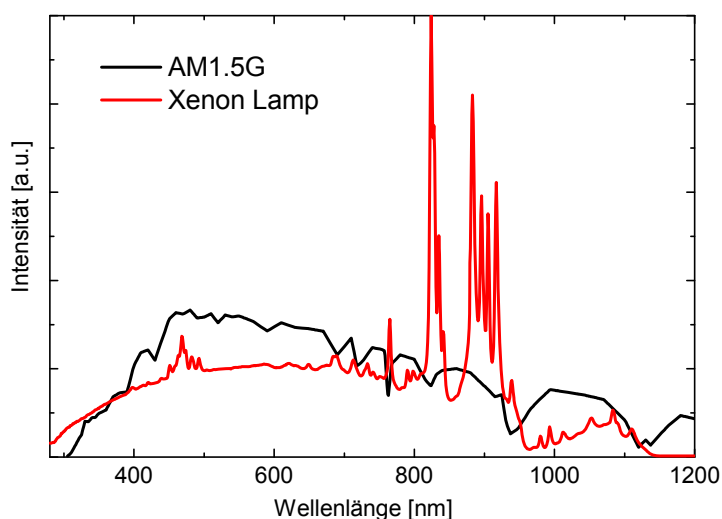


Abbildung 5.1: Zur WLR-Methode benutzte breitbandige Strahlung einer gefilterten Xenonkurzbogenlampe im Vergleich zum AM1.5g Standardspektrum.

Dabei wird die Gewichtung aus Gleichung (3.29) experimentell -anstatt rechnerisch- durchgeführt. Die so erhaltenen Messdaten sind als WLR I_{SC} in Abbildung 5.2 dargestellt.

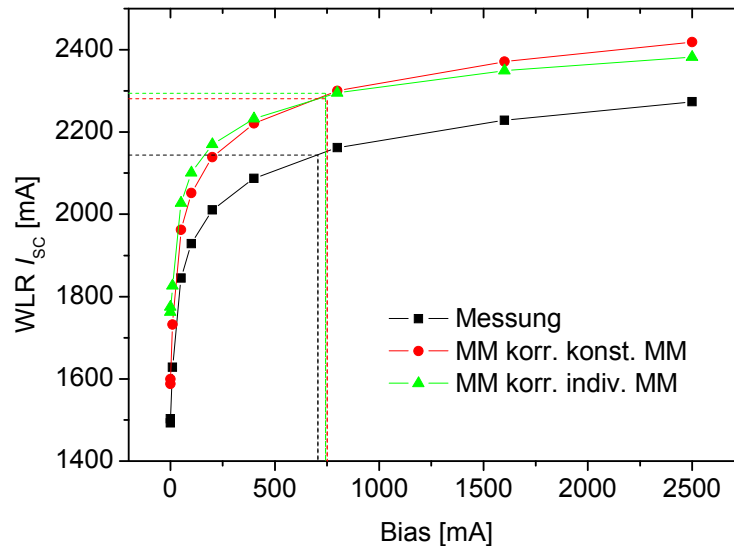


Abbildung 5.2: Gemessene und Mismatch korrigierte differentielle WLR I_{SC} Werte für eine Silicium Solarzelle auf defektreichem multi-kristallinem Material

Für lineare Solarzellen deren Kurzschlussstrom bzw. spektrale Empfindlichkeit proportional zur Einstrahlung ansteigt, ergibt sich ein konstanter Messwert. Für nichtlineare Solarzellen ergeben sich Messkurven wie in Abbildung 5.2 gezeigt. Die Ermittlung dieses Verhaltens war Gegenstand der Untersuchungen in [49]. In der vorliegenden Arbeit wurden die Unsicherheiten ermittelt, welche aus den Abweichungen des Messlichtes vom Normspektrum resultieren und dessen Einfluss auf die Bestimmung des Arbeitspunktes zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit und letztendlich auf die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit selbst. Aus diesen Daten kann aufgrund der strengen Monotonie der Kurven eine Biasbestrahlungsstärke ermittelt werden, bei der die differentiell gemessene spektrale Empfindlichkeit der SR(STC) entspricht. Um die Abweichungen des verwendeten breitbandigen Spektrums vom Normspektrums auf den Absolutwert des WLR I_{SC} zu berücksichtigen, wird eine Mismatchkorrektur durchgeführt. Da die Mismatchkorrektur nur nachträglich durchgeführt werden kann, dient Sie hier zur Abschätzung der zusätzlichen Messunsicherheit dieses Verfahrens. Dabei sind zwei MM-Korrekturen denkbar:

- MM-Korrektur mittels der SR, welche bei der mit der WLR-Methode ermittelten Biasbestrahlungsstärke bestimmt wurde.
- MM-Korrektur mittels der SR, welche für die jeweiligen bei der WLR-Methode gemessenen Biasbestrahlungsstärken ermittelt wurde.

Da die zweite Methode die Messung der spektralen Empfindlichkeiten bei mehreren Biasbestrahlungsstärken voraussetzt, dient diese ebenfalls nur zur Abschätzung der zusätzlichen Messunsicherheit gegenüber dem korrekten Messverfahren, wobei die erstere nach jeder Messung zur Kontrolle der Größe der Korrektur durchgeführt werden kann.

Aus den so erhaltenen drei WLR-Messdaten können 3 verschiedene Biasbestrahlungsstärken berechnet werden. Für das Beispiel in Abbildung 5.2 ergibt sich:

- I_{bias1} (ohne MM corr.) = 707 mA,
- I_{bias2} (konst. MM corr) = 752 mA; Möglichkeit 1),
- I_{bias2} (indiv. MM corr) = 744 mA; Möglichkeit 2).

5 Analyse und Minimierung der Unsicherheit einer großflächigen Messung der spektralen Empfindlichkeit

Aus einem Datensatz differentiell gemessener spektraler Empfindlichkeiten (s. Abbildung 2.8) können die Abweichungen zur $SR(STC)$ für Messungen bei unterschiedlichen Biasintensitäten berechnet werden (vgl. Abbildung 5.3).

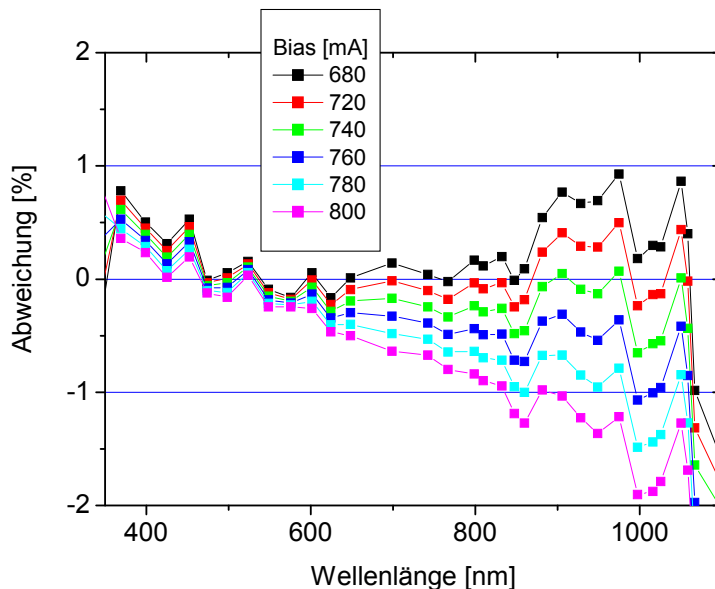


Abbildung 5.3: Abweichung der gemessenen DSR von der $SR(STC)$.

Der zusätzliche Fehler im Bereich von 700-760 mA Biasstrom liegt bei ungefähr 1 %.

Damit lässt sich folgende Messprozedur für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bei Standard Testbedingungen unter Verwendung der WLR-Methode anwenden:

- i) Messung des $I_{SC}^{WLR}(I_{bias})$ von 0 bis > 1 Sonne (Gleichung (3.29))
- ii) Bestimmung des I_{SC}^{STC} mittels Gleichung (3.28)
- iii) Bestimmung von I_{bias1} aus $I_{bias}(I_{SC}^{WLR} = I_{SC}^{STC})$
- iv) Messung der $DSR(I_{bias})$
- v) Berechnung des $MM(DSR(I_{bias}))$
- vi) Wenn der berechnete MM Fehler $\leq 5\%$ => zusätzliche Fehler auf SR entspricht obiger Abschätzung

Somit kann die $SR(STC)$ einer nichtlinearen Solarzelle mittels einer WLR und einer differentiellen spektralen Empfindlichkeit bestimmt werden.

5.1.2 Der Einfluss der Bandbreite

Die wesentlichen Einflussfaktoren wurden bereits in [50] und deren Unsicherheitsbeiträge bestimmt. Einer der wesentlichen Beiträge wird von der Bandbreite der quasimonochromatischen Strahlung in Verbindung mit den Flanken der spektralen Empfindlichkeiten verursacht. Daher wurde im Weiteren bei der Filterauswahl auf Halbwertsbreiten von unter 12 nm geachtet. Da die Messfehler der

Referenzmessung mit denen der Messung der Testzelle direkt korreliert sind kompensieren sich beide teilweise. Ausschlaggebend sind daher die Unterschiede der relativen Steigungen der beiden spektralen Empfindlichkeiten:

$$u_{\text{Bb,r}}(s_{\text{TC}}(\lambda_0)) = \left| \frac{\partial s_{\text{TC}} / \partial \lambda}{s_{\text{TC}}} - \frac{\partial s_{\text{RC}} / \partial \lambda}{s_{\text{RC}}} \right| u_{\text{Bb}}(\lambda_0) \quad (5.1)$$

Trotzdem können Messfehler im Prozentbereich auftreten (vgl. Abbildung 5.4).

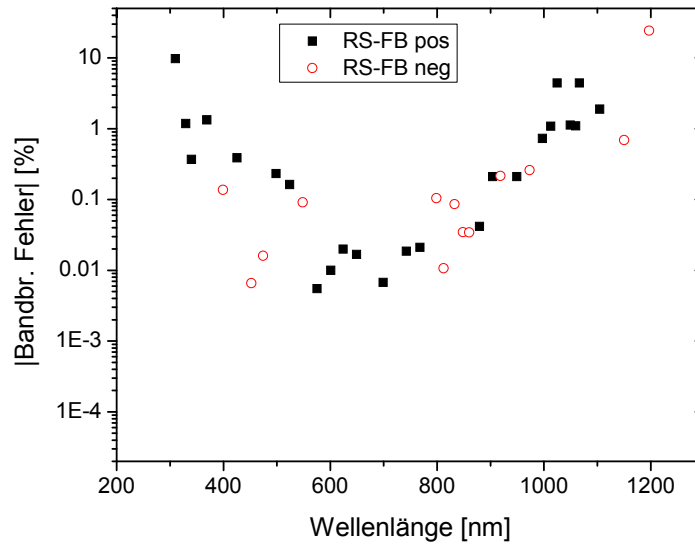


Abbildung 5.4: Fehlerbeträge verursacht durch die Bandbreite der quasimonochromatischen Strahlung bei der Messung der Zelle RS gegen die Referenz FB.

5.1.3 Der Einfluss der Blockung

Auch die endliche Blockung der Filter hat einen signifikanten Einfluss (vgl. [50]). Auch hier sind die Einflüsse der Messungen von Referenz- und Testzelle direkt korreliert. Der relative Fehler durch die begrenzte Blockung der Filter ist demnach bestimmt durch die Differenz beider Beiträge:

$$u_{\text{Bl}}(s_{\text{TC}}(\lambda_0)) = \left| \frac{\int SR_{\text{TC}}(\lambda) E_{\text{Bl}}(\lambda) \partial \lambda}{\int SR_{\text{TC}}(\lambda) E_{\text{mono}}(\lambda_0) \partial \lambda} - \frac{\int SR_{\text{RC}}(\lambda) E_{\text{Bl}}(\lambda) \partial \lambda}{\int SR_{\text{RC}}(\lambda) E_{\text{mono}}(\lambda_0) \partial \lambda} \right| \frac{SR_{\text{TC}}(\lambda_0)}{SR_{\text{RC}}(\lambda_0)} \quad (5.2)$$

Die verbleibenden Messfehler nach Berücksichtigung der Korrelation der Messsignale von Referenz und Testmessung sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

5 Analyse und Minimierung der Unsicherheit einer großflächigen Messung der spektralen Empfindlichkeit

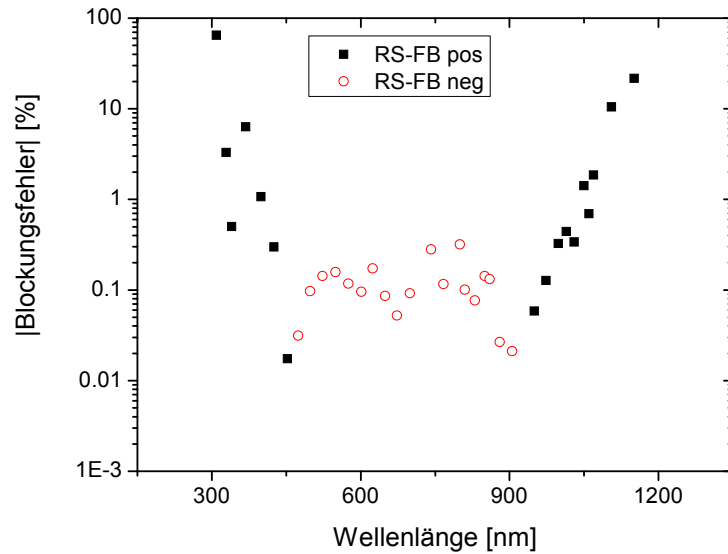
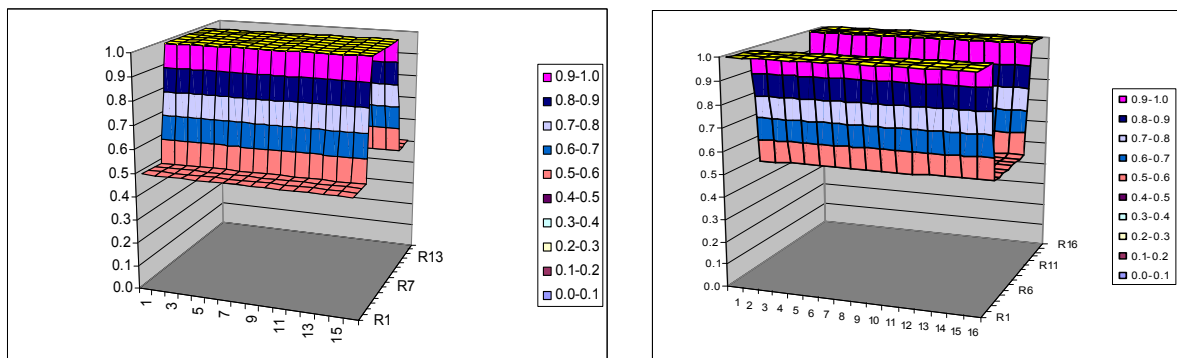


Abbildung 5.5: Verbleibender Fehler verursacht durch die Blockung bei der Messung der Zelle RS gegen die Referenz FB.

5.1.4 Der Einfluss der Inhomogenität

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Inhomogenität der monochromatischen Strahlung, welche beim vorhandenen Aufbau vom sogenannten Phaseneffekt dominiert wird (vgl. [50]). Zur Abschätzung des maximalen Einflusses wird die Auswirkung für zwei extreme Modellfälle quantitativ ermittelt. Dabei wurden die folgenden Fälle von Zellinhomogenitäten angenommen.



a)

b)

Abbildung 5.6: a) Modell für inhomogene Zelle Fall A. b) Modell für inhomogene Zelle Fall B.

Da der Phaseneffekt die Inhomogenität dominiert, wird hier für jede Lampe (Xe, Halogen) je eine Wellenlänge für die Berechnungen herangezogen.

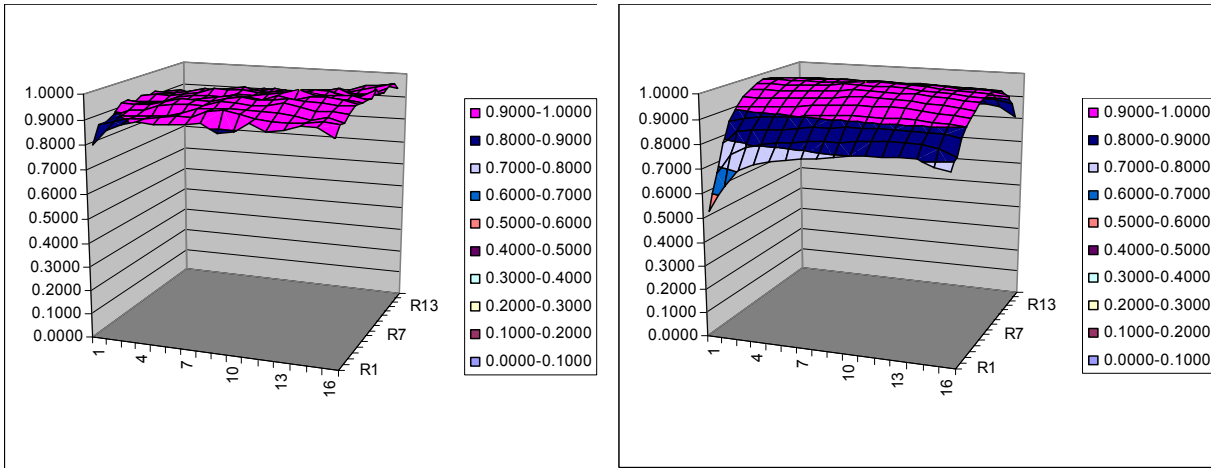


Abbildung 5.7: Lateraler Verlauf der norm. Rel. Bestrahlungsstärke incl Phaseneffekt für 601nm und 830nm Filter.

Damit lässt sich der Einfluss der Inhomogenität wie folgt abschätzen.

$$I1 = \int SR(x, y) * E(x, y) dx dy \quad I2 = \overline{SR} * \overline{E}; \quad (5.3)$$

$$k_{inh} = 1 - \frac{I1 - I2}{I1 + I2}$$

Für den obigen Fall mit einer Zelle die auf 50% der Fläche 100% und auf den restlichen 50% nur 50% SR (EQE) hat, ergeben sich die in Abbildung 5.8 dargestellten Unsicherheiten.

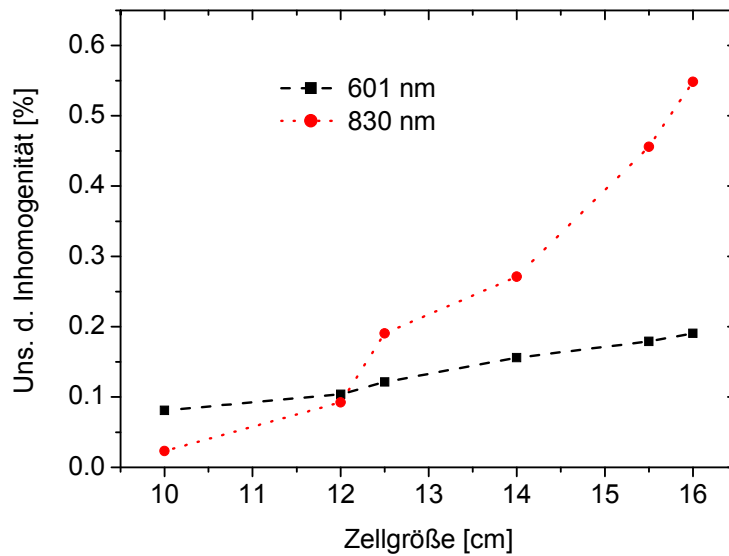
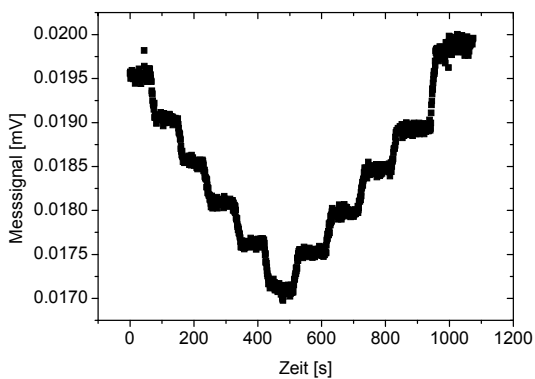


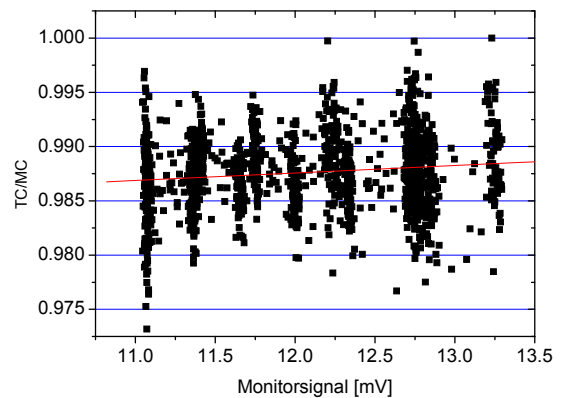
Abbildung 5.8: Auswirkungen der inhomogenen Messstrahlung bei der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit der Solarzelle und der Annahme einer stark inhomogenen Solarzelle (s. Abbildung 5.6).

5.1.5 Monitoreinheit

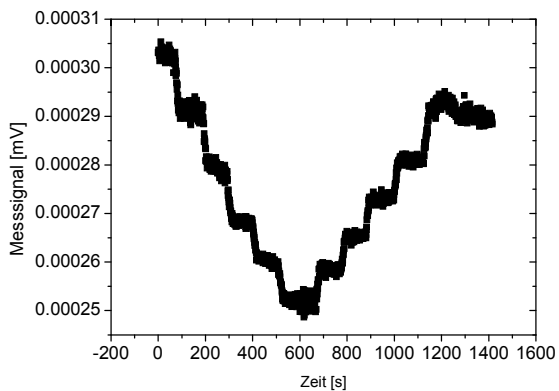
Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Messplatz um eine Monitoreinheit erweitert, so dass die Intensitätsschwankungen der Messstrahlung erfasst und korrigiert werden. Mittels einer WG Glasplatte als Strahlteiler wird ca. 7-10 % der Messstrahlung ausgekoppelt und mit einer Fresnellinse auf eine Photodiode projiziert. Da der Messplatz für Solarzellen unterschiedlicher Solarzellengrößen im überstrahlten Messverfahren genutzt wird, kann nicht für jede Zellgröße sichergestellt werden, dass die zu messende Solarzelle den selben lateralen Anteil des Messfleckes sieht. Um die Korrelation des Monitorsignals zum Messsignal zu untersuchen wurden bei verschiedenen Intensitäten der Messstrahlung beide Signale aufgenommen. Die Verwendung einer 2x2 cm² Referenzsolarzelle stellt hierbei sicher, dass ein hochlinearer Sensor verwendet wird. Des Weiteren ist die geometrische Fehlanpassung zwischen Messfleck und Referenzsolarzelle groß, was es erlaubt den Extremfall unterschiedlicher lateraler Anteile zu untersuchen. Eine Variation des Lampenstromes von ca. $\pm 10\%$ wurde für diese Untersuchung durchgeführt (s. Abbildung 5.9).



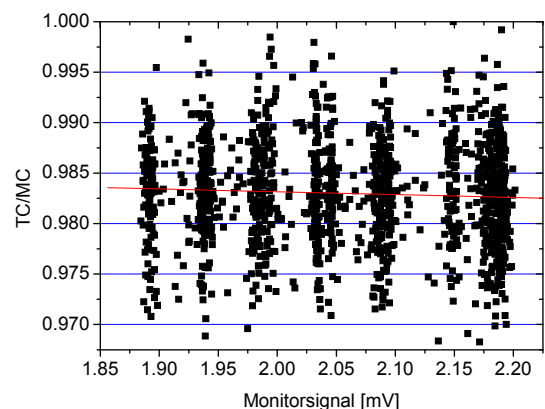
a)



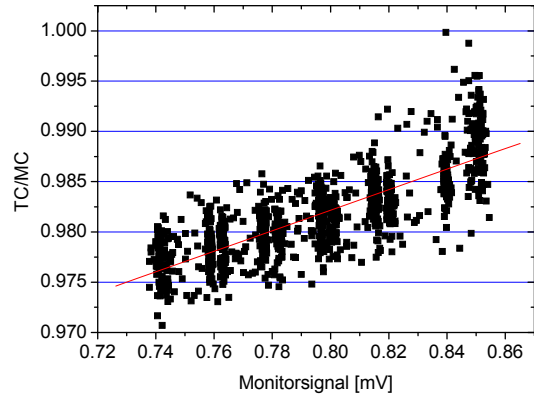
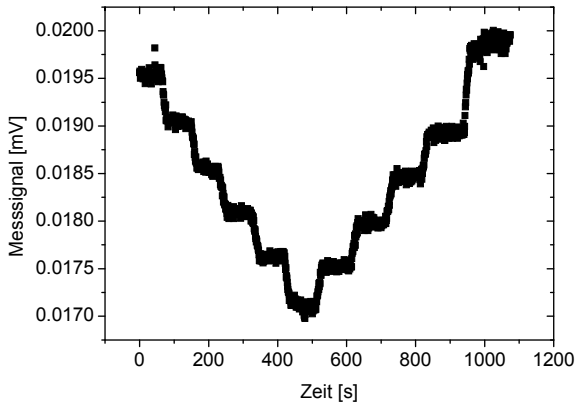
b)



c)



d)



e)

f)

Abbildung 5.9: Intensitätsvariationen der Xenonlampe für Strahlungen bei 500 nm (a) und 1000 nm (c) und bei breitbandiger Strahlung (WLR) (e). Die zugehörigen Quotienten der Messsignale der Testzelle (TC) und der Monitorzelle (MC) zeigen eine sehr gute Korrelation. Lediglich bei der breitbandigen Strahlung für die WLR-Methode ist ein nichtlinearer Zusammenhang erkennbar.

Die Auswertung der Messungen zeigt eine sehr gute Korrelation zwischen Messsignal und Monitorsignal. Für die breitbandige Strahlung, welche für die WLR Methode (vgl. Abschnitt 5.1.1) genutzt wird, ist der Einfluss einer Nichtlinearität der Photodiode zu erkennen. Bei größer werdendem Messsignal generiert die Photodiode der Monitorzelle zunehmend weniger Signal. Die Ursache hierfür ist der im Vergleich zu Solarzellen hohe Serienwiderstand der Photodiode. Da im Allgemeinen von einer Schwankung der Intensität der Xenonlampe von $\pm 5\%$ ausgegangen werden kann, sind die hierfür abgeschätzten Unsicherheiten:

	Abweichung [%]
500 nm	0.05
1000 nm	0.035
breitbandige Strahlung	0.8

Tabelle 5.1: Abweichung des monitorkorrigierten Signals bei einer Schwankung der Strahlungsintensität von $\pm 5\%$.

Die geringen Abweichungen bei Verwendung der monochromatischer Strahlung zeigen, dass die Anordnung der optischen Komponenten der Monitoreinheit gut gewählt wurde. Dabei ist anzunehmen, dass die Fresnellinse die unterschiedlichen lateralen Beiträge auf der Photodiode mischt, da sie für eine quadratische Apertur ausgelegt ist.

5.1.6 Weitere Beiträge und Zusammenfassung

Aufgrund der Divergenz der monochromatischen Strahlung muss die Dicke der Solarzellen, vor allem bei Verwendung eine verkapselten Zelle oder eines zusätzlichen Messblockes ausgeglichen werden. Die Messunsicherheit der Zelldicke und der Einstellung der Messtischhöhe ergibt dabei eine Unsicherheit von 0.1 %/mm.

Weitere Beiträge wurden untersucht und sind in Gleichung (5.4) berücksichtigt zur Bestimmung der gesamten Messunsicherheit der spektralen Empfindlichkeit von großflächigen Solarzellen.

5 Analyse und Minimierung der Unsicherheit einer großflächigen Messung der spektralen Empfindlichkeit

$$SR_{TC}(\lambda) = \frac{\frac{U^{TC}(\lambda)}{U_{Mon}^{TC}(\lambda)} / R_{TC}}{\frac{U^{RC}(\lambda)}{U_{Mon}^{RC}(\lambda)} / R_{RC}} SR_{RC}(\lambda) k_{Elektr} k_{BL} k_{Bb} k_{R1} k_{WL} k_T k_{NL} k_{Inh} k_{pos} k_f k_{Pha} k_H \quad (5.4)$$

- $U^{TC,RC}$: Spannungwert des Lockin-Verstärkers bei Messung der Testzelle bzw. Referenzzelle
 $U_{Mon}^{TC,RC}$: Spannungwert des Lockin-Verstärkers der Monitorzelle,ei Messung der Testzelle bzw. Referenzzelle
 $R_{TC,RC}$: Wert des Messwiderstandes bei Messung der Testzelle bzw. Referenzzelle

Die k-Faktoren repräsentieren die Quellen für Typ B Messunsicherheiten:

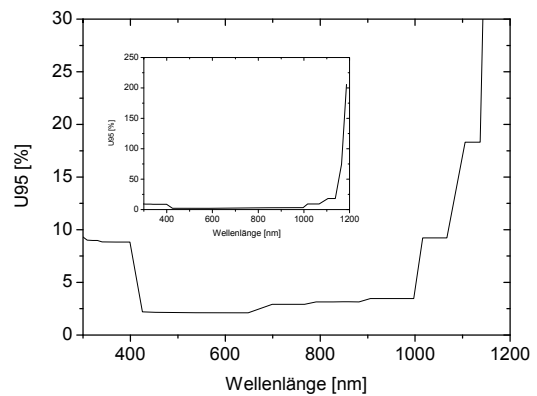
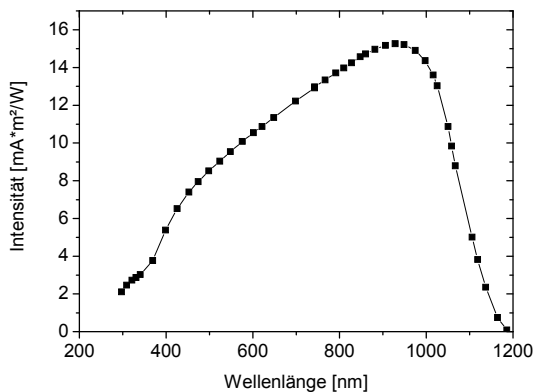
		Jeweils RC, TC Referenz-, Testzelle:	
u_{RC} :	Messunsicherheit der Referenzsolarzelle	u_{Wid} :	Rückkopplungswiderstand
u_{Elektr} :	Messelektronik (IV-Wandler, LockIn Verstärker)	u_T :	Messunsicherheit durch Temperatur
u_A :	Messunsicherheit der Flächenmessung	u_{NL} :	Nichtlinearität
u_{Bl} :	Messunsicherheit durch Blockung	u_{Inh} :	Inhomogenität
u_{Bb} :	Messunsicherheit durch Bandbreite	u_{Pha} :	Phaseneinstellung
u_{R1} :	Drift d. Strahlungsquellen		
	Wellenlängenfehler		
u_{WL} :	Positionierung		
u_{pos} :	Frequenz		
u_f :	Höheneinstellung		
u_H :			

Standardmessunsicherheit: $U = k \sqrt{u_{bias}^2 + u_{StdAbw,TC}^2 + u_{StdAbw,RC}^2}$ Jeweils RC, TC Referenz-, Testzelle:
 u_{StdAbw} : Standardabweichung der Messung
 mit obigen Unsicherheiten
 $u_{bias} = \sqrt{\sum_i u_i^2}$

Dabei sind folgende Unsicherheiten von der Größe der Testzelle abhängig:

$u_{Inh,TC}$, $u_{pos,TC}$, $u_{pha,TC}$.

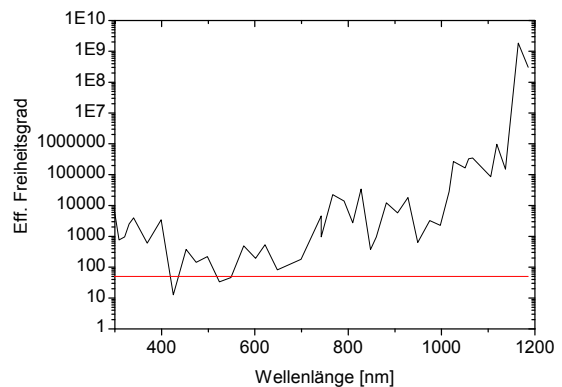
Die Sensitivitätskoeffizienten ergeben sich bei Betrachtung relativer Unsicherheiten zu 1. Die effektiven Freiheitsgrade wurden nach der Welch-Satterthwaite-Formel berechnet.



a)

Abbildung 5.10: Messergebnis der spektralen Empfindlichkeit gemessen an einer 6“ Industriesolarzelle (a), der beigeordneten Messunsicherheit) im 95% Vertrauensintervall (b) und der berechnete eff. Freiheitsgrad (c).

b)



c)

Um den effektiven Freiheitsgrad zu erhöhen und Werte > 50 sicherzustellen wurde die Anzahl der Messpunkte bei der Messung der Referenzsolarzelle erhöht.

5.1.7 Einfluss von Solarzellenparametern auf die Messelektronik

Extreme Eigenschaften der Solarzellen, welche über die in Abschnitt 5.1.6 zusammengefassten Beiträge zur Messunsicherheit hinausgehen, können zusätzlich die Messung beeinflussen. Die Messelektronik des Messplatzes zur Messung der spektralen Bestrahlungsstärke-Empfindlichkeit wurde in der Diplomarbeit von Arne Fallisch [51] eingehend untersucht, sowie an einer Weiterentwicklung dieser gearbeitet. Zur Messung des AC-Signals der differentiellen spektralen Empfindlichkeit wird eine Transimpedanzschaltung verwendet. Hierbei wird die Solarzelle direkt mit dem Eingang eines Operationsverstärkers (OPA) verbunden, dessen Ausgang über einen Rückkopplungswiderstand den Strom der Solarzelle kompensiert, so dass am Eingang des OPA die Spannungsdifferenz 0V beträgt. Damit befindet sich die Solarzelle – bis auf Leitungsverluste – im Kurzschlussbetrieb (I_{SC}). Diese Leitungsverluste werden in der Praxis mittels einer Potentialverschiebung am + Eingang des OPA kompensiert.

5 Analyse und Minimierung der Unsicherheit einer großflächigen Messung der spektralen Empfindlichkeit

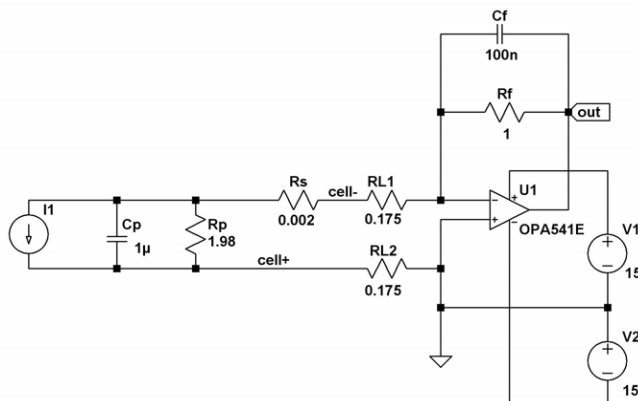


Abbildung 5.11: Ersatzschaltbild der Solarzelle (I_1 , C_p , R_p und R_s) in Verbindung mit der Messelektronik (Transimpedanzschaltung) unter Berücksichtigung der Leitungswiderstände (R_{L1} und R_{L2}).

Damit kann die Solarzelle trotz hoher Biasströme mit einer Regelgenauigkeit von einigen $100 \mu\text{V}$ im Kurzschluss betrieben werden. Betrachtet man die Übertragungsfunktion des Gesamtschaltbildes für das 126Hz AC-Signal, so ergibt sich eine zunehmende Dämpfung für geringe Parallelwiderstände der Solarzelle in Verbindung mit den Leitungswiderständen.

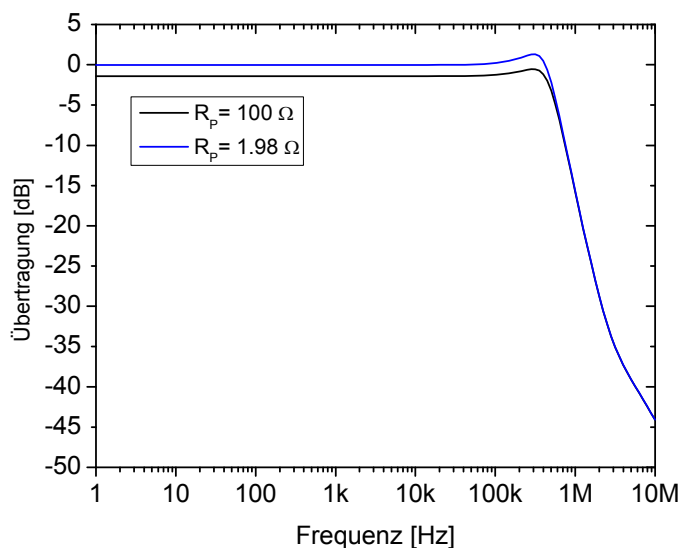
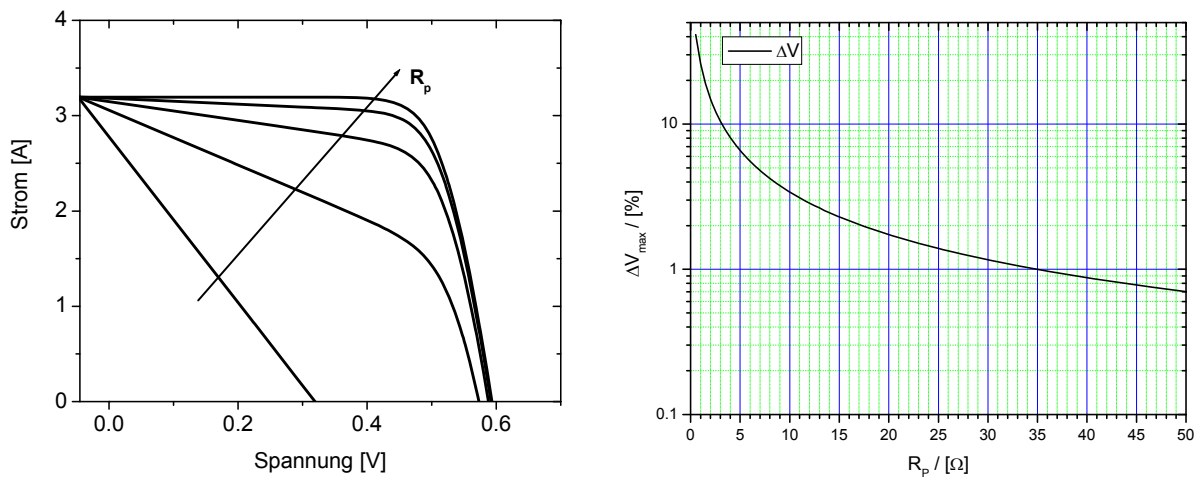


Abbildung 5.12: Übertragungsfunktion der Messschaltung unter Berücksichtigung der Leitungswiderstände bei verschiedenen R_p der Solarzelle.

Der Einfluss eines geringen Parallelwiderstandes auf die Messung führt zu einem zu niedrigen Messsignal unabhängig von der gemessenen Wellenlänge bzw. Signalstärke. Damit kann dieser Einfluss bei bekanntem R_p der Solarzelle korrigiert werden. Die Berechnung der entstehenden Abweichungen ist in Abbildung 5.13 dargestellt.



a)

b)

Abbildung 5.13: a) Solarzellen IV-Kennlinien bei verschiedenen Parallelwiderständen und b) die daraus resultierenden Abweichungen im Messsignal bei der eingesetzten Messschaltung.

Die aus der spektralen Empfindlichkeit bestimmten Kurzschlussstromdichten können mit den am Sonnensimulator stationär gemessenen Kurzschlussstromdichten verglichen werden. Berechnet man R_p so erhält man für Solarzelle 1 $553/243 \text{ Ohm} = 2.28 \text{ Ohm}$. Die berechnete Abweichung ΔV_{\max} ergibt sich zu 10.9 % und stimmt im Rahmen der Messunsicherheiten mit den experimentell bestimmten Wert von 11.8 % sehr gut überein (vgl. Tabelle 5.2).

Solarzelle	R_s [$\Omega \cdot \text{cm}^2$]	R_p [$\Omega \cdot \text{cm}^2$]	Fläche [cm^2]	R_f [Ω]	J_{SC} (Sim) [mA/cm ²]	J_{SC} (SR) [mA/cm ²]	$\Delta J_{SC,rel}$ [%]
1	0.59	553	243	1	31.62	28.10	-11.79
2	0.46	484	243	1	30.07	26.70	-11.87

Tabelle 5.2: Solarzellenparameter zur Bestimmung der Abweichung des AC-Messsignals aufgrund der Dämpfung der Messverstärkerschaltung durch den Einfluss eines geringen R_p in Verbindung mit Leitungswiderständen.

Weitere Berechnungen zeigen, dass eine Messschaltung in Vierleitertechnik nicht von Parallel- und Leitungswiderständen beeinflusst ist, jedoch ist dies in der Praxis, aufgrund der langen Verbindungsleitungen und der Antennenwirkung der Solarzellenmetallisierung selbst, mit starken Störsignalen verbunden.

5.1.8 Verbesserungspotential

Ein dominierender Anteil der Messunsicherheiten wird durch die Abschätzung der Nichtlinearität verursacht. Das dafür gewählte Verfahren wurde bisher mit einem Extremfall gestestet und hierfür auch die Messunsicherheit abgeschätzt (s. Abschnitt 5.1.1). Daher ist es notwendig, dieses Verfahren weiter zu entwickeln. Dies betrifft vor allem die Messelektronik, welche selbst bei hohen Biasströmen ein geringes AC-Signal möglichst rauscharm übertragen sollte. Der Einsatz einer solchen Messelektronik würde auch die Anwendung der vollen DSR-Methode erlauben, was hinsichtlich der Berücksichtigung der

5 Analyse und Minimierung der Unsicherheit einer großflächigen Messung der spektralen Empfindlichkeit

Nichtlinearität die beste Möglichkeit darstellt. Da die meisten Industriesolarzellen sehr linear sind, könnte auch mit einer Präzisierung der Abschätzung eine Verbesserung der Messunsicherheit erreicht werden.

Auch die Verbesserung der spektralen Verteilung des breitbandigen Messlichtes des WLR-Verfahrens ist für eine weitere Verbesserung notwendig. Dies hat sowohl eine bessere Gewichtung der einzelnen spektral abhängigen Beiträge als auch eine genauere Bestimmung des Absolutwertes der WLR-Werte zur Folge. Mit Letzterem würde auch die Bestimmung des Arbeitspunktes genauer werden.

Die Optimierung der Intensität der breitbandigen Strahlung hinsichtlich des Linearitätsbereiches der Photodiode stellt eine einfache und notwendige Verbesserung dar. Da dies mit Hilfe einer Filterung der Messstrahlung realisiert wird, ist dies mit einer gleichzeitigen Anpassung der spektralen Verteilung durchzuführen.

Die Homogenität der monochromatischen Strahlung bietet ein weiteres Verbesserungspotential, gleichzeitig würde auch der Einfluss der Positioniergenauigkeit minimiert. Bisher konnte durch den Einsatz eines zweiten Chopperrades die Position dieser deutlich zur Strahlungsquelle hin verschoben werden. Dies reduziert deutlich den Phaseneffekt und verbessert damit die gesamte Homogenität. Die Korrekturfaktoren wurden hierdurch um ca. einen Faktor 2 reduziert.

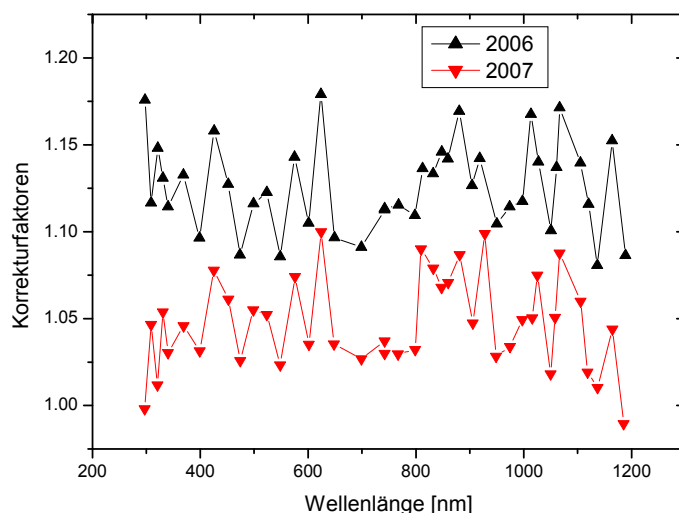


Abbildung 5.14: Verbesserung der Korrekturfaktoren der Inhomogenitätskorrektur durch Optimierung der Position des Chopperrades.

Mit dem bisherigen Messaufbau ist man jedoch begrenzt, was die weitere Verbesserung der Homogenität betrifft, da die meisten Möglichkeiten die Strahlungsintensität reduzieren würden. Dies ist jedoch aufgrund der geringen Intensitäten nicht sinnvoll. Abbildung 5.15 zeigt die derzeit erreichten Strahlungsleistungen.

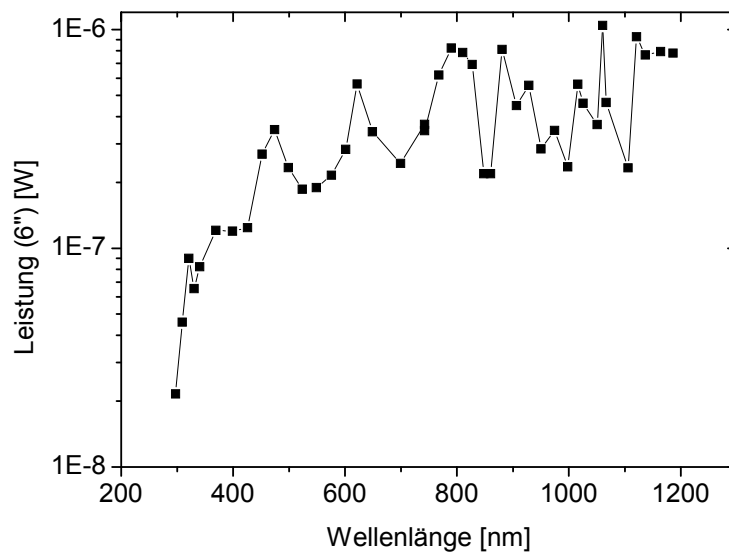


Abbildung 5.15: Intensitäten auf eine 6“ Messfläche des Filtermonochromatormessplatzes.

Deutlich höhere Intensitäten sind mit Lasersystemen erreichbar, welche bereits abstimbar in Wellenlängenbereichen von 250-2500 nm verfügbar sind. Damit lassen sich Intensitäten von einigen Watt erzielen. Solche Systeme sind als Puls laser ausgeführt (ns-fs), wodurch jedoch eine Strahlkonditionierung notwendig wird. Obwohl zu erwarten ist, dass dies die Intensitäten deutlich reduziert, wird man wesentlich höhere Strahlungsleistungen als bei herkömmlichen Systemen erreichen.

Die Verbesserung der Strahlungsverteilung der Biasbestrahlung würde für Solarzellen mit einer starken spektralen Abhängigkeit (s. [52]) eine Verbesserung darstellen. Würde diese mit einer flexibel mischbaren Strahlungsquelle realisiert, so wäre auch zusätzlich die Messung von Mehrfach solarzellen möglich.

Die Weiterentwicklung und praktische Umsetzung der Messelektronik (hinsichtlich Vierleitertechnik) aufbauend auf der Diplomarbeit von Arne Fallisch [51] würde zu einer Verbesserung der Messung und des Messablaufs führen.

5.2 Zusammenfassung

Die Einführung der WLR (White Light Response) Methode zur Kalibrierung von Solarzellen durch diese Arbeit stellt eine sehr effiziente Vereinfachung der DSR Methode der PTB zur Erfassung der Nichtlinearitäten von Solarzellen bei der differentiellen spektralen Empfindlichkeitsmessung dar. Mit diesem integralen und selbstkonsistenten Verfahren kann die Abhängigkeit des Kurzschlussstromes von der Bestrahlungsstärke bestimmt und bei der differentiellen spektralen Empfindlichkeitsmessung der Solarzelle berücksichtigt werden. Hiermit sind am Fraunhofer ISE CalLab erstmals rückführbare Messungen der spektralen Empfindlichkeit in größerem Umfang möglich.

Die ausführliche Vorstellung der einzelnen Messunsicherheitsbeiträge erlaubt es weitere Verbesserungen gezielt durchzuführen. Die Bestimmung der gesamten Messunsicherheit zeigt, dass rückführbare Messungen mit hoher Genauigkeit möglich sind.

Detailuntersuchungen zu Messelektronik im Rahmen der Diplomarbeit von Arne Fallisch erlauben ein gutes Verständnis vom Zusammenspiel mit den Eigenschaften der Solarzelle. Somit können Unterschiede im ermittelten Kurzschlussstrom im Vergleich zur Messung am Sonnensimulator quantitativ verstanden werden.

6 Analyse und Minimierung der Unsicherheit für die rückführbare Messung einer IV-Kennlinie

Die wichtigste und am schwierigsten zu bestimmende Messgröße stellt der Kurzschlussstrom der Solarzelle unter Standard Testbedingungen dar. Die wesentlichen Messunsicherheitsbeiträge sind in kurzen Kapitelteilen zusammengefasst. Hierbei dominieren die radiometrischen Größen für die Bestimmung der absoluten Bestrahlungsstärke, welche als Eingangsgrößen die in Kapitel 4 und 5 dargestellten Größen der spektralen Verteilung der Bestrahlungsstärke und der spektralen Empfindlichkeit benötigen. Das Zusammenwirken dieser Messunsicherheiten, über die mathematisch mittels Integration bestimmte Größe des spektralen Mismatch wird mit dafür neu entwickelten Methoden detailliert untersucht. Des Weiteren wird der Einfluss der Kontaktierung einzelner Solarzellen in Kalibrierungen und die vorwiegend in der Industrie eingesetzte IR-Kamera basierte Temperaturmessung untersucht. Die Untersuchung der Genauigkeit der Bestimmung des Temperaturkoeffizienten und weiterer Messprozeduren schließen das Kapitel ab.

6.1 Übersicht der Einflussfaktoren

6.1.1 Messunsicherheit Kurzschlussstrommessung (I_{sc})

Die einzelnen Beiträge zur Messunsicherheit der Kurzschlussstrommessung unter STC sind hier zusammengefasst. Im Wesentlichen wird diese Messung von der Bestimmung der Bestrahlungsstärke (1000 W/m^2 AM1.5g) dominiert. Weitere kleinere Beiträge sind auf die Temperaturunsicherheit zurückzuführen. Untergeordnete Beiträge kommen von der eigentlichen Strommessung (Kalibrierung der Messinstrumente und des Messwiderstandes).

Die Messunsicherheit der Referenzsolarzelle wird von der PTB in Braunschweig zu $U_{95} \approx 0.7 \%$ bestimmt. Der Übertrag (vgl. Abbildung 6.1) erfolgt mittels einer Photodiode vom Kryoradiometer (nationales Primärnormal für Strahlungsleistung) der PTB in Berlin über die DSR Apparatur [29] der PTB Braunschweig auf $2 \times 2 \text{ cm}^2$ Referenzsolarzellen (s. Abschnitt 7.1).

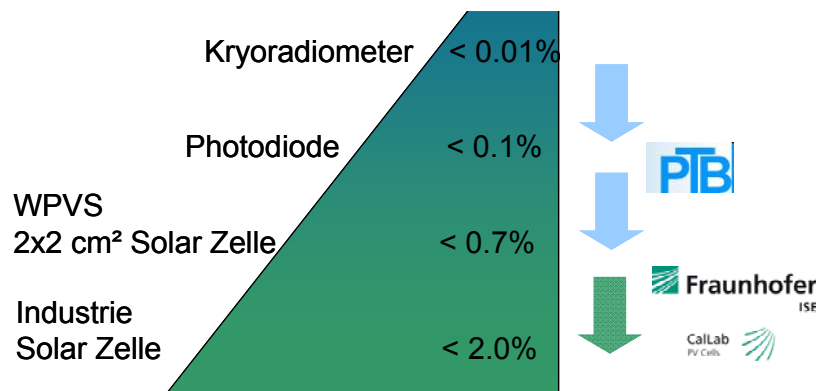


Abbildung 6.1: Zunahme der Messunsicherheit beim Übertrag vom nationalen Primärnormal für Strahlungsleistung (Kryoradiometer) auf großflächige Industriesolarzellen.

Die Kontrolle der Kalibrierwerte der Referenzsolarzellen wird durch einen internen Vergleich verschiedener Referenzsolarzellen realisiert (s. Abbildung 7.3). Die hierbei zu erwartende maximale Abweichung wird derzeit auf 1 % geschätzt. Eine weitere Reduzierung der Gesamtmessunsicherheit wird auf der Verbesserung dieser Referenzzellenüberwachung basieren (s. Abschnitt 7.8). Die Beiträge zur Unsicherheit der Messung des Kurzschlussstromes sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst (Grundlage der aktuellen Akkreditierung).

		Standardmessunsicherheit (k=1)	Anteil an Gesamtmessunsicherheit Quadrate	
Refzelle:DMM (messbereichs-, signal- und temperaturabhängig), Monitorzelle-temperaturabh., Rückkopplungswiderst (Monitor)-temperaturabh., Rückkopplungswiderstand (Absolut, Temperatur)	U_{RC-M}	0.0075	0.0001	0.01%
Messunsicherheit (PTB), Degradation	U_{RC-R}	0.7638	0.5833	71.07%
Standardabweichung Referenzzelle	U_{RC}	0.0764	0.0058	0.71%
Testzelle:DMM (Messbereichs-, Signal- und temperaturabhängig), Monitorzelle-Temperaturabh., Rückkopplungswiderst (Monitor)-Temperaturabh., Rückkopplungswiderstand (Absolut, Temperatur)	U_{TC-M}	0.0173	0.0003	0.04%
Standardabweichung Testzelle	U_{TC}	0.0749	0.0056	0.68%
Höheneinstellung	U_H	0.3348	0.1121	13.65%
Refzelle Temperaturmessung	$U_{RC,T}$	0.0081	0.0001	0.01%
Testzelle Temperaturmessung	$U_{TC,T}$	0.0203	0.0004	0.05%
Spektraler Mismatch	U_{MM}	0.0600	0.0036	0.44%
Laterale Inhomogenität (integral)	U_{fH}	0.0231	0.0005	0.06%
Staub, Streulicht, Thermospannung, Strahldivergenz(Reflexion), Abweichung vom senkrechten Einfall, Mehrfachreflexion	U_Z	0.0667	0.0045	0.54%
Laterale Inhomogenität (spektral)	U_{SH}	0.3233	0.1045	12.74%
	Summe	1.7762	0.821	100.00%
	eff. Standardmessunsicherheit Freiheitsgrad (k=1)		0.906	
	Erweiterte Messunsicherheit 49092475 eit U95 (k=2)		1.812	k=2

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Messunsicherheiten für die Bestimmung des Kurzschlussstromes unter STC.

Die Detailuntersuchungen zur Messunsicherheit des spektralen Mismatchfaktors sind in Abschnitt 6.2 zusammengefasst. Die Abschätzung weiterer kleinerer Messunsicherheitsbeiträge entstammen vorhergehenden Arbeiten (s. [53]).

Zusammengefasst werden alle Einflüsse in der vollständigen Modellgleichung:

$$I_{SC} = I_{TC,R} = \frac{U_{TC}}{U_{Mon,TC,M}} \frac{R_{RC,M}}{R_{TC,M}} \frac{f_h}{M} \frac{U_{Mon,RC,M} I_{RC,R}}{U_{RC}} k_H k_T k_Z k_{SH} \quad (6.1)$$

Mit

$$k_T = (1 - Tk_{TC} \Delta T_{TC}) / (1 - Tk_{RC} \Delta T_{RC}) \quad (6.2)$$

6 Analyse und Minimierung der Unsicherheit für die rückführbare Messung einer IV-Kennlinie

$X_{TC \text{ bzw. } RC}$:	Messung der Testzelle bzw der Referenzzelle
$I_{TC,R}$:	Strom der Testzelle
$U_{TC \text{ bzw. } RC}$:	Spannungsmessung am Rückkopplungswiderstand
$U_{Mon,TC \text{ bzw. } RC,M}$:	Spannungsmessung am Rückkopplungswiderstand der Monitorzelle
$R_{RC \text{ bzw. } TC,M}$:	Rückkopplungswiderstand
f_h :	Korrektur der Inhomogenität
M :	Korrektur des spektralen Mismatch
$I_{RC,R}$:	Kalibrierwert der Referenzsolarzelle
k_H :	Faktor nahe 1, der Messunsicherheiten durch die Höheneinstellung berücksichtigt
$\Delta T_{RC \text{ bzw. } TC}$:	Abweichung der Temperatur der Referenz- bzw. Testsolarzelle von der Solltemperatur
$Tk_{TC,RC}$:	Temperaturkoeffizient der Test- bzw. Referenzsolarzelle
k_Z :	Faktor nahe 1, der Messunsicherheiten durch Staub, Streulicht, Thermospannung, Strahldivergenz(Reflexion), Abweichung vom senkrechten Einfall und Mehrfachreflexion berücksichtigt
k_{SH} :	Faktor nahe 1, der Messunsicherheiten durch die spektrale Inhomogenität des Strahlungsfeldes berücksichtigt

6.1.2 Messunsicherheit der Spannungsmessung (U_{OC})

Die Bestimmung der Offenen-Klemmenspannung (U_{OC}) unter STC hängt im Wesentlichen von der Bestimmung der Zelltemperatur (25°C) ab. Weitere Einflüsse sind zu berücksichtigen, haben jedoch einen untergeordneten Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit. Der Einfluss der Einstrahlung ist aufgrund des logarithmischen Zusammenhangs von Strom (~Einstrahlung) und Spannung (vgl. Gl. (6.3)) gering und mit einem Sensitivitätskoeffizienten von 0.025 V/A zu berücksichtigen.

$$U_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (6.3)$$

Die Tabelle 6.2 fasst die Beiträge der Messunsicherheit zur Messung der offenen Klemmenspannung zusammen.

		Sensitivitätskoeffizienten	Standardmessunsicherheit (k=1)	Quadrate	Anteil an Gesamtmessunsicherheit
Bestrahlungsstärke	$U_{I_{SC}}$	0.025	0.0226	0.0005	2.39%
Temperatur des Messobjektes	U_{VT}		0.1443	0.0208	96.99%
DMM (Messbereichs-, Signal- und Temperaturabhängig)	U_{V-DMM}		0.0115	0.0001	0.62%
Thermospannung	U_{Th}		0.0008	0.0000	0.00%
			Summe	0.02148038	100.00%
			Standardmessunsicherheit (k=1)	0.15	
			Erweiterte Messunsicherheit U95 (k=2)	0.29	

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Messunsicherheiten für die Bestimmung der offenen Klemmenspannung U_{OC} unter STC.

6.1.3 Unsicherheit der Bestimmung des Punkts maximaler Leistung (P_{MPP})

Der Punkt maximaler Leistung ist als der Punkt auf der Kennlinie definiert, in dem das Produkt von Spannung und Strom maximal ist. Zur Bestimmung von P_{MPP} wird an die Messkurve ein Polynom 5. Grades angepasst, jedoch nur an die Messpunkte mit 85% oder mehr Leistung als der Punkt maximal gemessener Strom-Spannungs-Produkte.

Für die Messung der Strom und Spannungswerte gelten die analog zu den Unsicherheiten für I_{SC} und U_{OC} gebildeten Unsicherheitswerte. Dabei sind sowohl I und U der Testzelle von T abhängig und somit sind die Größen I und U (negativ) korreliert. Jedoch ist aufgrund des sehr kleinen Temperaturkoeffizienten ($T_{ki} = 0.07\%/K$) für den Strom der Solarzelle und des sehr vielen größeren Temperaturkoeffizienten ($T_{ku} = -0.5\%/K$) für die Spannung der Solarzelle diese Korrelation vernachlässigbar. Ebenfalls sind I und U beide einstrahlungsabhängig und damit (positiv) korreliert. Die Einstrahlungsabhängigkeit der Spannung ist jedoch um mehr als eine Größenordnung kleiner als die des Stromes (vgl. Gl. (6.3)). Damit ist auch diese Korrelation vernachlässigbar.

		Standardmessunsicherheit (k=1)	Quadrate	Anteil an Gesamtmessunsicherheit
Bestimmung des I_{SC}	$U_{I_{SC}}$	0.9464	0.8956	87.56%
Bestimmung des V_{OC}	$U_{V_{OC}}$	0.1467	0.0215	2.10%
Temperatur	U_{VT}	0.1443	0.0208	2.04%
Mpp-Fit	U_{pfit}	0.2887	0.0833	8.15%
Kontaktierung	U_k	0.0400	0.0016	0.16%
		Summe	1.0229	100.00%
		Standardmessunsicherheit (k=1)	1.01	
		Erweiterte Messunsicherheit U95 (k=2)	2.02	

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Messunsicherheiten für die Bestimmung der maximalen Leistung P_{MPP} unter STC.

Tabelle 6.3 fasst die Beiträge zur Messunsicherheit der Leistung der Solarzelle zusammen. Es folgt die vollständige Modellgleichung:

$$P_{MPP} = U \cdot I = U \cdot I_{TC,R} = \frac{U_{TC,M}}{U_{Mon,TC,M}} \frac{R_{RC,M}}{R_{TC,M}} \frac{f_h}{M} \frac{U_{Mon,RC,M} I_{RC,R}}{U_{RC,M}} k_H k_{RC,T} k_{TC,T} k_Z k_{SH} \quad (6.4)$$

6.1.4 Unsicherheit der Füllfaktor-Bestimmung

Der Füllfaktor ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$FF = \frac{I_{MPP} U_{MPP}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (6.5)$$

Bei einer Berechnung aus den Einzelunsicherheiten von P_{MPP} und I_{SC} erhält man jedoch wesentlich zu hohe Werte, da der FF innerhalb der bei der Messung auftretenden Variationsbreite in der Einstrahlung von 2% von der Höhe der Einstrahlung praktisch unabhängig ist. Damit können alle Beiträge für die Messung der Bestrahlungsstärke vernachlässigt werden. Es bleiben im Wesentlichen die Fehlerbeiträge der Messinstrumente, der Temperatur und der Kurvenanpassung.

	Standardmessunsicherheit (k=1)	Quadrat	Anteil an Gesamtmessunsicherheit	
Strommessung	$U_{TM 5}$	0.0133	0.0002	0.17%
Standardabw. I	$R_{TC,M}$	0.0146	0.0002	0.20%
Temperatur V	U_{VT}	0.1443	0.0208	19.90%
Spannungsmessung	U_{V-DMM}	0.0115	0.0001	0.13%
Mpp-Fit	U_{pfit}	0.2887	0.0833	79.60%
	Summe		0.1047	100.00%
	Standardmessunsicherheit (k=1)		0.32	
	Erweiterte Messunsicherheit U95 (k=2)		0.65	

Tabelle 6.4: Zusammenfassung der Messunsicherheiten für die Bestimmung des Füllfaktors FF unter STC.

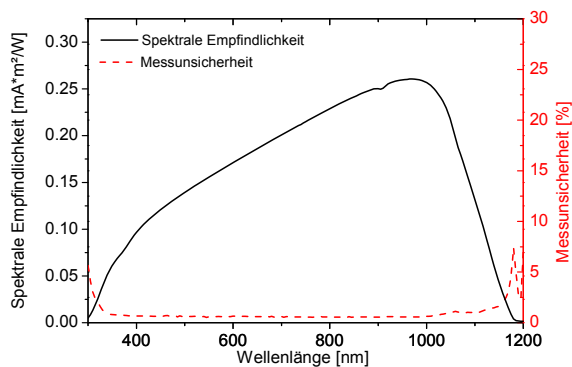
6.2 Korrektur der spektralen Fehlanpassung

6.2.1 Unsicherheit des Spektralkorrekturfaktors

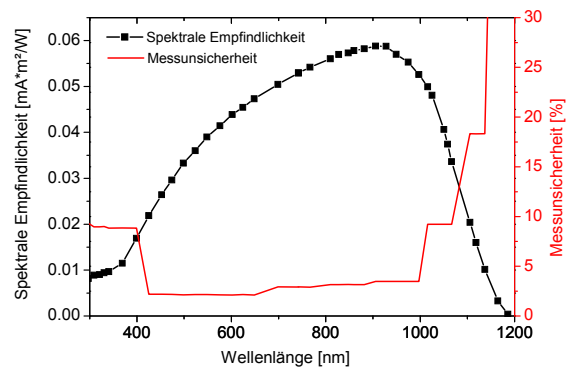
Wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben, tritt bei der Vergleichsmessung zweier Solarzellen an einem Sonnensimulator eine spektrale Fehlanpassung auf. Diese kann bei Kenntnis der spektralen Verteilung und der beiden spektralen Empfindlichkeiten der verwendeten Solarzellen nach Gleichung (3.32) bezüglich eines Normspektrums berechnet werden. Hierbei sind drei der Eingangsgrößen das Ergebnis einer Messung und daher mit Messunsicherheiten behaftet:

- Spektrale Empfindlichkeit der Referenzsolarzelle
- Spektrale Empfindlichkeit der Testsolarzelle (vgl. Abschnitt 5)
- Spektrale Verteilung des Sonnensimulators (vgl. Abschnitt 4)

Die Messung der spektralen Empfindlichkeiten für die Referenzsolarzellen wird bei der PTB in Braunschweig durchgeführt. Die beigeordneten Messunsicherheiten erreichen Werte $< 0.6\%$ (s. Abbildung 6.2 a)) und sind damit hochgenau. Für die Messung großflächiger Solarzellen mit einer Bewertung der gesamten Solarzellenfläche ist das Fraunhofer ISE Callab PV Cells spezialisiert. Hierbei werden Messunsicherheiten $< 3\%$ erreicht (s. Abbildung 6.2 b)).



a)



b)

Abbildung 6.2: Spektrale Empfindlichkeiten einer $2\times 2\text{ cm}^2$ Referenzsolarzelle a) und einer $15.6\times 15.6\text{ cm}^2$ Testsolarzelle b) mit den beigeordneten Messunsicherheiten.

Die Messung der spektralen Verteilung der Bestrahlungsstärke eines Sonnensimulators erfordert eine vollständig untersuchte Kalibrierkette (vgl. Abschnitt 4.3). Die Messunsicherheiten liegen hierbei oberhalb 3% .

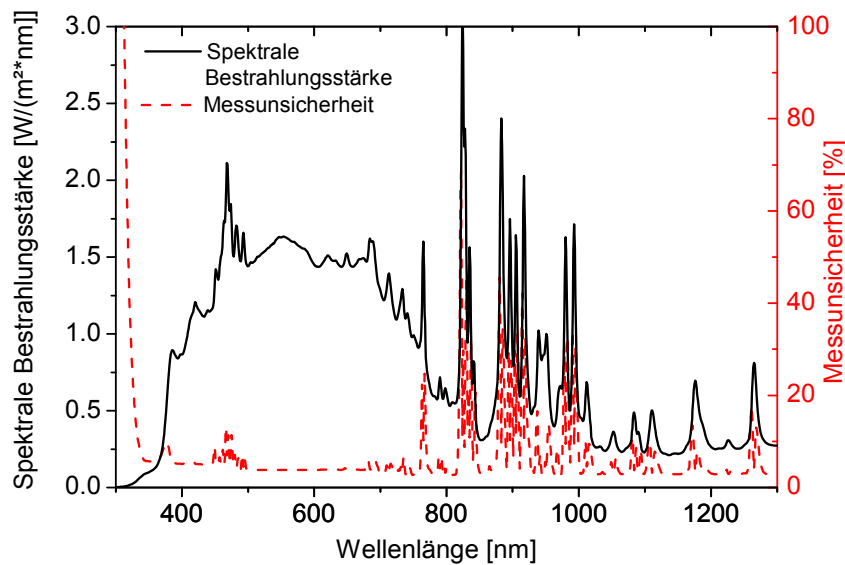


Abbildung 6.3: Spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke eines Xenonlampen Sonnensimulators mit den beigeordneten Messunsicherheiten.

Alle Eingangsgrößen sind wellenlängenabhängige Größen mit wellenlängenabhängigen Messunsicherheiten. Die Messunsicherheitsbudgets dieser Größen sind dominiert von sogenannten Typ B Messunsicherheiten (s. [54]), deren Ermittlung nicht mittels Statistik erfolgt. Bei der Messung der spektralen Empfindlichkeit verursacht die lateral inhomogene Messstrahlung zusammen mit der lateralen Inhomogenität der Solarzelle einen Messfehler, dessen Größe nicht bekannt ist und daher Teil des Messunsicherheitsbudgets ist. Bei beiden Ursachen kann davon ausgegangen werden, dass diese stark korreliert sind für benachbarte Wellenlängen. Bei Nichtlinearitäten kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass diese trotz Wellenlängenabhängigkeit mit einer starken Korrelation benachbarter Wellenlängen einhergehen.

Ebenso wirken sich apparative Ursachen für Messunsicherheiten meist nicht nur auf die Messung einer Wellenlänge aus. Bei Temperatur- oder Frequenzdrifts während des Messablaufes werden ebenfalls benachbarte Wellenlängen in ähnlicher Weise betroffen.

Die Auswirkung der Messunsicherheiten der drei Eingangsgrößen auf den integral berechneten spektralen Mismatchfaktor ist keine einfache Aufgabe (vgl. [55-57]) und kann mittels Monte Carlo Methoden (vgl. [56]) berechnet werden. Um Messunsicherheiten für die Mismatchfaktoren zu berechnen und spektrale Abhängigkeiten zu untersuchen, wurde hier eine Methode entwickelt, welche auf Zufallskurven (1-D Random Walks) basiert. Diese Zufallskurven berechnen sich als Summe aufeinanderfolgender Zufallszahlen. Damit sind die benachbarten Werte solcher Reihen miteinander korreliert. Da die Messunsicherheiten benachbarter Wellenlängen ebenfalls stark korreliert sind, eignen sich solche Zufallskurven zur Modellierung möglicher Messkurven innerhalb der Messunsicherheiten. Dies wird wie folgt realisiert:

$$MM_i = \frac{\int [RU_i^{TC}(\lambda) + SR_{TC}(\lambda)][RU_i^{SIM}(\lambda) + E_{SIM}(\lambda)]\partial\lambda}{\int [RU_i^{TC}(\lambda) + SR_{TC}(\lambda)]E_{STC}(\lambda)\partial\lambda} \cdot \frac{\int [RU_i^{RC}(\lambda) + SR_{RC}(\lambda)][RU_i^{SIM}(\lambda) + E_{SIM}(\lambda)]\partial\lambda}{\int [RU_i^{RC}(\lambda) + SR_{RC}(\lambda)]E_{STC}(\lambda)\partial\lambda} \quad (6.6)$$

mit:

$$RU^{TC,RC,SIM} = RW_i U^{TC,RC,SIM}$$

RW_i : Random Walk mit derselben Länge wie der Datensatz (TC, RC, SIM)

Die Random Walks $RW_i^{TC}(\lambda)$, $RW_i^{RC}(\lambda)$ und $RW_i^{SIM}(\lambda)$ wurden zufällig aus einem Satz von 10000 zuvor berechneten Zufallskurven ausgewählt. Die damit berechneten 10000 MM Faktoren ergeben eine typische Gaußverteilung.

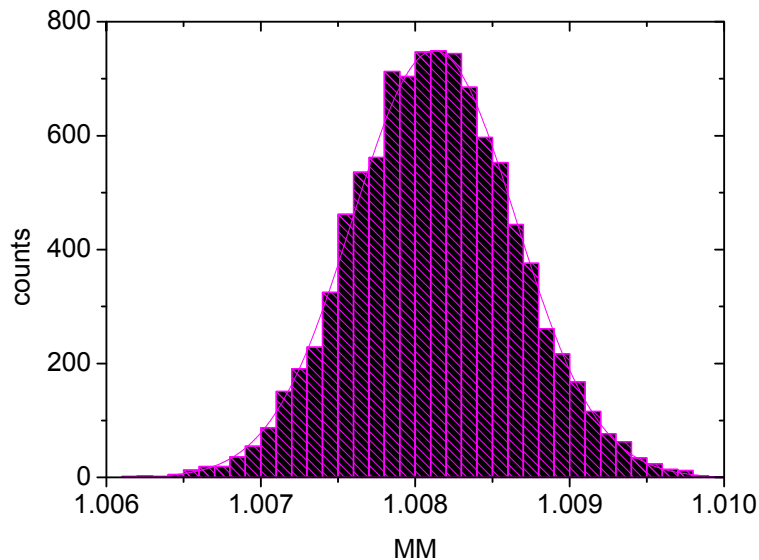


Abbildung 6.4: Die Variation der Eingangsgrößen $SR^{TC}(\lambda)$, $SR^{RC}(\lambda)$ und $E^{Sim}(\lambda)$ mit 10000 Zufallskurven ergibt 10000 gaußverteilte Mismatchfaktoren.

Aus der Varianz der Gaußverteilung der Mismatchfaktoren (s. Abbildung 6.4) kann deren Unsicherheit abgeleitet werden.

Mit dieser Methode wurden für verschiedene Kombinationen aus Referenzsolarzellendaten und dem Datensatz einer typischen multikristallinen Industriesolarzelle weitere Berechnungen durchgeführt. Die dabei verwendeten spektralen Empfindlichkeiten umfassen eine große Bandbreite von Silicium Solarzellen, sowie eine gefilterte Silicium Referenzsolarzelle, wie sie als angepasste Referenz für amorphe Siliciumsolarzellen eingesetzt werden.

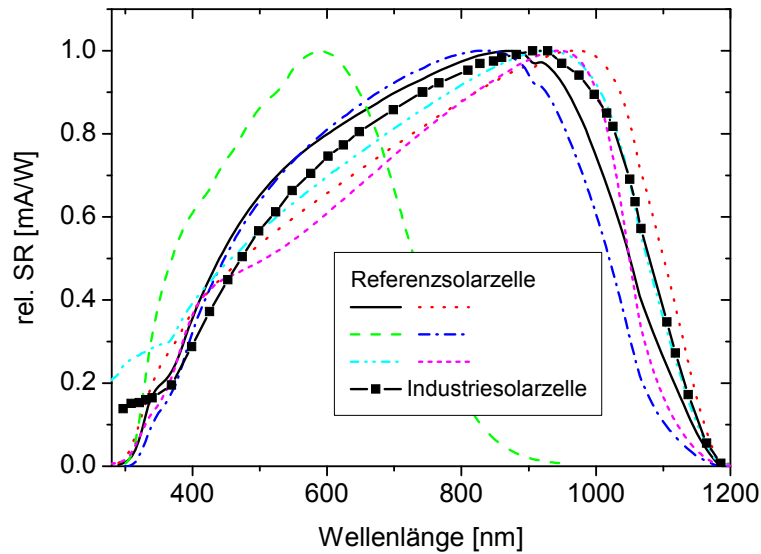


Abbildung 6.5: Relative spektrale Empfindlichkeiten von Referenzsolarzellen und einer typischen multikristallinen Siliciumsolarzelle. Die spektralen Empfindlichkeiten der Referenzsolarzellen decken einen breiten Bereich unterschiedlicher Siliciumsolarzellentechnologien ab.

Um den Einfluss unterschiedlicher Strahlungsverteilungen von typischen Xenonlampen-basierten Sonnensimulatoren zu untersuchen wurde ein Datensatz eines sehr guten Klasse A Spektrums (s. [44]) mittels Multiplikation mit einer Geraden so manipuliert, dass eine Schar von Spektren entsteht, welche ein unterschiedliches UV/IR Verhältnis aufweisen.

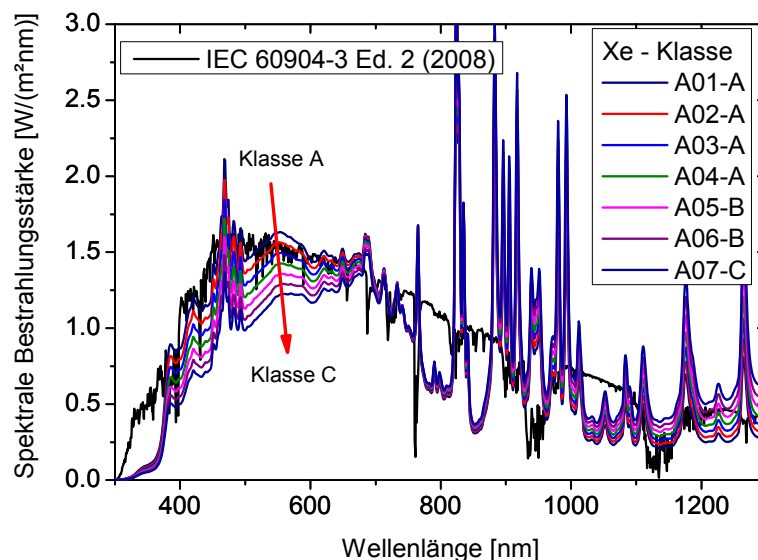


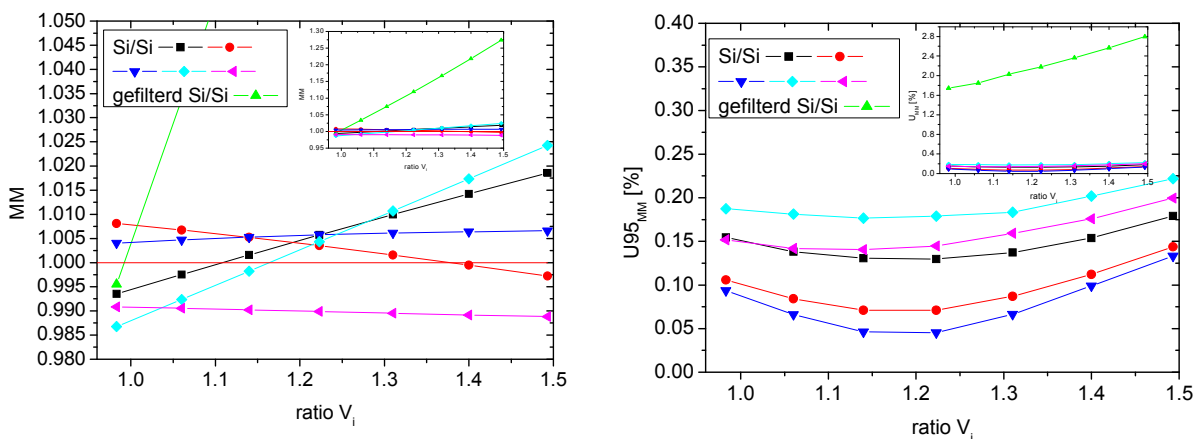
Abbildung 6.6: Spektrale Bestrahlungsstärken eines Xenonlampen basierten Sonnensimulators und die daraus berechneten Variationen mit unterschiedlichem UV/IR Verhältnis im Vergleich zum AM1.5G Standardspektrum.

Um die verwendeten spektralen Verteilungen den späteren Berechnungen zuzuordnen, wurde nach IEC 60904-9 die Anteile der unterschiedlichen Spektralbereiche berechnet (V_i ; vgl. Gl. (4.19)) und die Spektren den entsprechenden Klassen zugeordnet.

Spektrum	Wellenlänge [nm]						Klasse
	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1100	
A01	0.988	1.046	1.075	0.888	0.990	0.983	A
A02	0.928	1.010	1.065	0.902	1.035	1.060	A
A03	0.871	0.972	1.054	0.915	1.079	1.140	A
A04	0.815	0.934	1.041	0.925	1.122	1.223	A
A05	0.761	0.896	1.025	0.934	1.164	1.310	B
A06	0.709	0.857	1.007	0.941	1.206	1.400	B
A07	0.659	0.818	0.988	0.946	1.246	1.493	C

Tabelle 6.5: Klassifikation der spektralen Verteilungen nach der Norm IEC 60904-9. Die Tabelle zeigt die Verhältnisse V_i des AM1.5g Ed.2 (2008) Standard-Spektrums zu den Spektren A01 bis A07 in 100/200 nm Bereichen.

Die Verhältnisse der Spektren zum Standardspektrum im Bereich 900-1100 nm quantifizieren den IR Anteil und werden im Weiteren zur Zuordnung von Spektren bei den daraus berechneten Werten (MM und Unsicherheiten) verwendet. Für alle spektralen Empfindlichkeiten aus Abbildung 6.5 und alle spektralen Verteilungen aus Abbildung 6.6 werden Mismatchfaktoren und deren Unsicherheiten mit der oben beschriebenen Methode bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Grafiken in Abbildung 6.7 zusammengefasst.



a)

b)

Abbildung 6.7: MM-Faktoren a) und deren Unsicherheiten b).

Die Mismatchfaktoren in Abbildung 6.7 zeigen eine unterschiedliche Abhängigkeit von einer zunehmenden Rotverschiebung (V_i ansteigend) der Spektralverteilung. Eine starker Anstieg des MM Faktor ist auf eine weniger gute spektrale Anpassung der beiden Solarzellen zurückzuführen, korreliert jedoch nicht mit dem Absolutwert des MM. Die Kombination einer gefilterten Silicium-Referenz mit einer mc-Si Solarzelle weist beim Ausgangsspektrum den geringsten MM auf, jedoch ist dieser sehr sensibel, was geringe spektrale Veränderungen betrifft.

Die bestimmten Unsicherheiten der Mismatchfaktoren liegen für Si/Si Kombinationen durchweg unter 0.2 % und für die Kombination der gefilterten Si Zelle mit der mc-Si Zelle bei 1.7 %. Die Unsicherheiten zeigen im Bereich eines rotlastigen Klasse A Spektrums ($V_i \approx 1.2$) ein Minimum. Dies ist auf den speziellen Kurvenverlauf des Xenonlampenspektrums im Vergleich zu einem AM1.5g Normspektrum zurückzuführen und wird im Abschnitt 6.2.3 erläutert.

Wie bereits die Steigungen der MM-Kurven, korrelieren auch die Unsicherheiten der Mismatchfaktoren nicht mit den Absolutwerten derselben. Vergleicht man jedoch die Unsicherheiten mit den

Anpassungsfaktoren in Tabelle 3.6 (Berechnungen für die selben Solarzellenkombinationen), so erkennt man, dass der Anpassungsfaktor (Gl. (3.39)) eine geeignete Größe zu Auswahl der Referenzsolarzellen und zur Minimierung der Messunsicherheiten darstellt.

6.2.2 Einfluss kleiner Variationen der Intensität

Zur Korrektur der Inhomogenität und des spektralen Mismatch wird direkt bei der Messung der Solarzelle die Intensität des Sonnensimulators so eingestellt, dass die Solarzelle möglichst genau beim Strom unter STC betrieben wird. Da dies durch die Änderung des Lampenstromes realisiert wird, muss prinzipiell von einer Änderung der spektralen Verteilung ausgegangen werden. Die Homogenitätskorrektur liegt typischerweise bei < 1 %. Die Referenzsolarzelle wird im Regelfall so gewählt, dass der spektrale Mismatch ebenfalls bei < 1 % liegt. Im Idealfall kompensieren sich beide oder aber sie summieren sich zu 2 %. Aus einer Serie von gemessenen Spektren im Bereich von 1000W/m² kann die Änderung des Mismatchfaktors für unterschiedliche Kombinationen von Referenzsolarzelle und Testsolarzelle abgeschätzt werden. Für verschiedene Referenzsolarzellen in Kombination mit einer multikristallinen Industriesolarzelle sind die Abweichungen vom berechneten Mismatchfaktor in Tabelle 6.6 zusammengestellt.

Refzelle	Steigung MM [1/mV]	Stromänderung
DF28	-0.000070	-0.0175%
ISE006	0.000020	0.0050%
ISE040	-0.000900	-0.2250%
SC33	0.000001	0.0003%
RES12	-0.000090	-0.0225%
TF31-1	0.000050	0.0125%

Tabelle 6.6: Änderung der Mismatchfaktoren in Abhängigkeit des Monitorwertes (der Intensität) und die Auswirkung auf den Kurzschlussstrom bei einer Intensitätsänderung von 2 %.

Somit kann die Änderung des Mismatchfaktors durch die Intensitätsänderung bei der Mismatch bzw. Homogenitätskorrektur vernachlässigt werden, vor allem, wenn man berücksichtigt, das für die reale Messung bei der Auswahl der Referenzsolarzelle die Zelle SC33 gewählt würde (vgl. Abschnitt 3.3).

6.2.3 Wellenlängenabhängige Sensitivitätsanalyse

Um den Einfluss verschiedener Wellenlängenbereiche zum Mismatchfaktor zu verstehen wurde eine Sensitivitätsanalyse entwickelt. Des Weiteren ermöglicht dies eine Fokussierung auf relevante Wellenlängenbereiche bei der Optimierung von Spektren, Referenzsolarzellen und der Weiterentwicklung der Spektralmesstechnik.

Zur Bewertung des Einflusses einzelner Wellenlängenbereiche wurden mittels einer Funktion $t(\lambda_i, \lambda)$ die Spektralanteile bei der MM-Berechnung variiert und die Abweichung vom „störfreien“ MM als Maß für die Sensitivität berechnet.

$$t(\lambda_i, \lambda) = 1.1; \quad \text{für } (\lambda_i - 10/2) \leq \lambda < (\lambda_i + 10/2)$$

$$t(\lambda_i, \lambda) = 1; \quad \text{sonst}$$

$$MM(\lambda_i) = \frac{\int t(\lambda_i, \lambda) SR_{TC}(\lambda) E_{SIM}(\lambda) \partial \lambda}{\int t(\lambda_i, \lambda) SR_{TC}(\lambda) E_{STC}(\lambda) \partial \lambda} \quad (6.7)$$

$$= \frac{\int t(\lambda_i, \lambda) SR_{RC}(\lambda) E_{SIM}(\lambda) \partial \lambda}{\int t(\lambda_i, \lambda) SR_{RC}(\lambda) E_{STC}(\lambda) \partial \lambda}$$

Diese Analyse wurde für 3 Kombinationen von Referenzsolarzellen mit einer mc-Si Solarzelle durchgeführt.

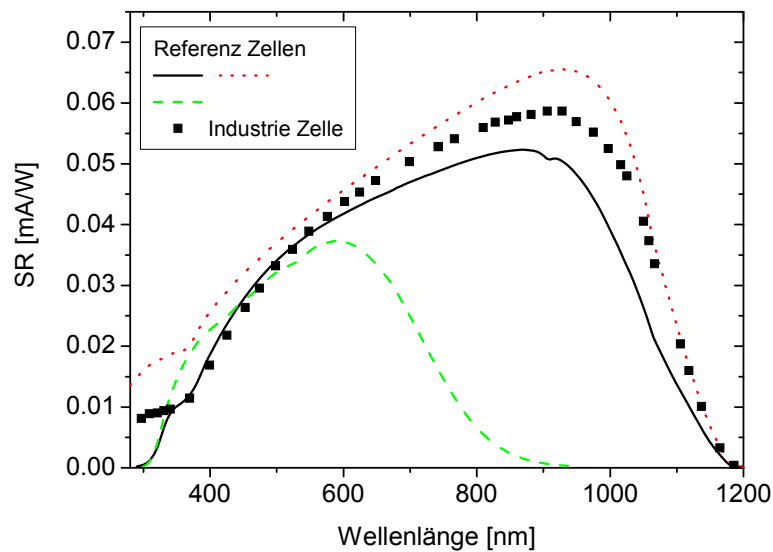


Abbildung 6.8: Für die wellenlängenabhängige Sensitivitätsanalyse wurden die spektralen Empfindlichkeiten einer Hocheffizienz-Referenzsolarzelle, einer Referenzsolarzelle mit geringer IR Empfindlichkeit, einer gefilterten Siliciumsolarzelle und einer mc-Si Industriesolarzelle verwendet.

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 6.9 zeigt vorwiegend Bereiche im IR mit höheren Beiträgen zum MM. Bereiche mit niedriger SR der Referenzsolarzelle gegenüber der SR der Testsolarzelle in Kombination mit geringerer Einstrahlung des Sonnensimulators gegenüber dem Normspektrum ergeben Beiträge zum MM kleiner 1 (s. Abbildung 6.9 Bereich d)), umgekehrt entsprechend.

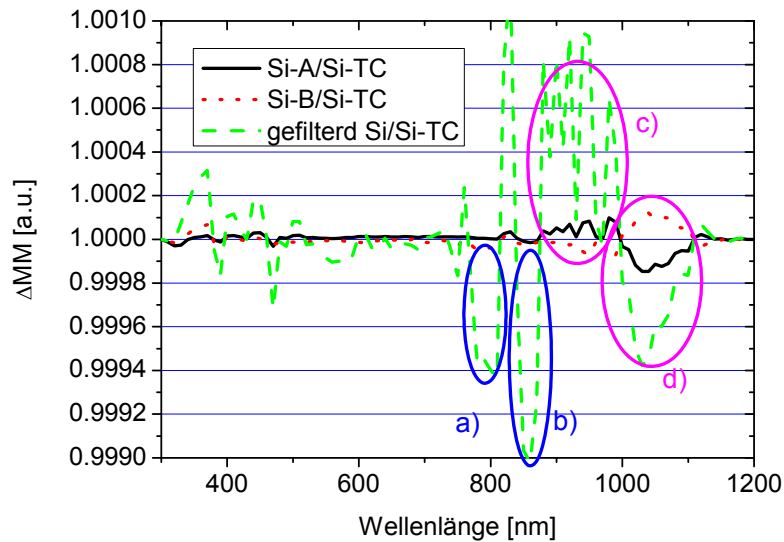


Abbildung 6.9: Ergebnis der wellenlängenabhängigen Sensitivitätsanalyse des MM Faktors für 3 verschiedene Kombinationen von Referenz- und Testsolarzelle.

Für die Kombination Si-A/Si-TC und Si-B/Si-TC sind die selben Bereiche relevant, jedoch mit umgekehrter Auswirkung. Entsprechend führt dies auch zu MM von 0.9936 und 1.0095. Für die Kombination mit der gefilterten Solarzelle kommen sehr starke Beiträge aus den Bereichen a) bis d). Bei den Si/Si Kombinationen dominieren die Bereiche c) und d), da sich die Beiträge aus den Bereichen a) – b) von beiden Zellen kompensieren.

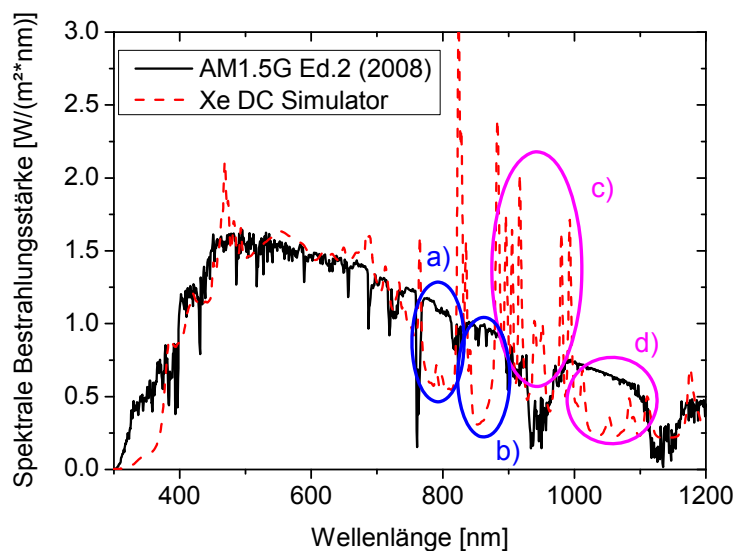


Abbildung 6.10: Die Sensitivitätsanalyse zeigt Wellenlängenbereiche oberhalb 900 nm in denen sich Si-Solarzellen in ihrer Empfindlichkeit unterscheiden (a) und b)) und Bereiche unterhalb 900 nm, welche nur bei der Kombination gefilterte Si zu mc-Si zum Tragen kommen.

Mit zunehmendem IR Anteil im Spektrum (vgl. Abbildung 6.6) werden die Unterschiede im Bereich d) geringer. Da dieser Bereich den Beitrag zum MM dominiert, sinkt mit zunehmendem IR Anteil in

Abbildung 6.7 b) die Messunsicherheit zuerst leicht. Da das verwendete Spektralradiometer (s. Abschnitt 4.1) nicht nur auf einem Silicium Sensor basiert, sondern einen ab 950 nm empfindlichen InGaAs-Sensor verwendet, werden im Bereich d) (1000-1100 nm) sehr geringe Messunsicherheiten bei der Messung der spektralen Bestrahlungsstärke erreicht. Bei Geräten mit rein Silicium-basierter Sensorik steigt die Messunsicherheit aufgrund des geringen Signals oberhalb 1000 nm stark an und oberhalb 1100 nm wird kein Signal mehr gemessen.

6.2.4 Einfluss der Wellenlängenauflösung der Spektralmessung

Aufgrund der begrenzten optischen Auflösung eines Spektralradiometers (vgl. Abschnitt 4.3.3) stellt sich die Frage, welchen Einfluss die mangelnde Kenntnis der exakten Strahlungsverteilung bei einem mit Emissionslinien durchsetzten Spektrum, wie es von Xenonlampen emittiert wird, auf die Kalibrierung von Solarzellen hat. Dazu wurde mit einem Doppelmonochromatorsystem die Spektralverteilung eines Xenonlampen-Sonnensimulators mit einer optischen Auflösung von 1 nm gemessen. Diese Messdaten wurden mittels Entfaltung einer realen Spektralverteilung angenähert und mittels Kurvenglättung wurden Daten für geringere Auflösungen bis 100 nm Bandbreite erzeugt (s. Abbildung 6.11).

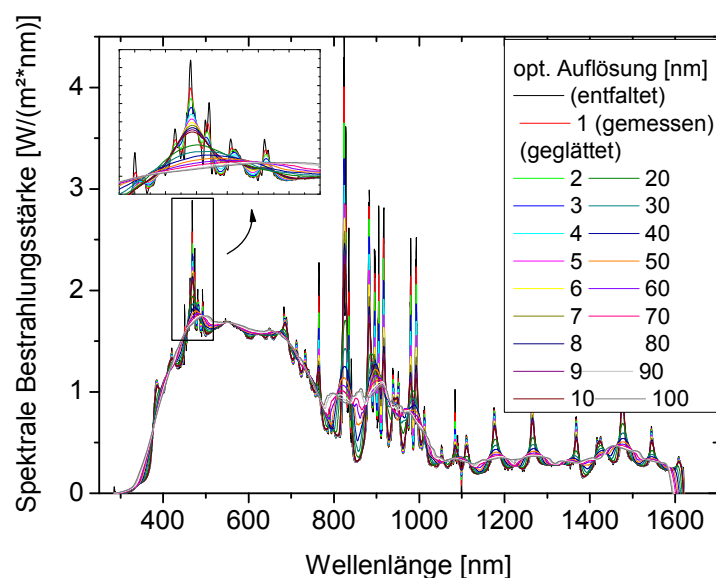


Abbildung 6.11: Daten der spektralen Verteilung eines Xenon Sonnensimulators mit 1 nm Auflösung mittels einem Doppelmonochromatorsystem gemessen und daraus berechnete Werte für unterschiedliche Auflösungen. Die optische Auflösung konnte so im Bereich von 1-100 nm variiert werden.

Mit diesen Spektren lassen sich Mismatchfaktoren für verschiedene Kombinationen von Silicium und KG-gefilterten Silicium-Referenzsolarzellen mit einer Silicium-Industriesolarzelle berechnen. Diese sind für verschiedene Kombinationen in Abbildung 6.12 zusammengestellt.

6 Analyse und Minimierung der Unsicherheit für die rückführbare Messung einer IV-Kennlinie

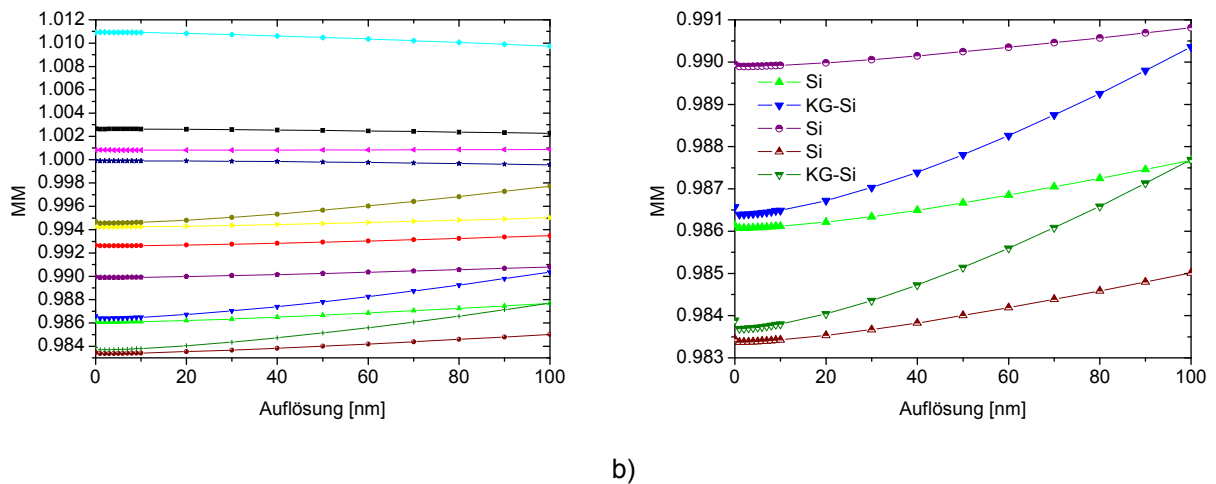


Abbildung 6.12: Berechnete Mismatchfaktoren für verschiedene Kombinationen von Referenz und Testzelle. Der Ausschnitt rechts (b) zeigt eine vernachlässigbare Abweichung bis 10 nm Auflösung selbst bei der Kombination einer gefilterten Silicium-Referenzsolarzelle mit einer mc-Silicium-Solarzelle.

Abbildung 6.12 b) (Ausschnitt mit den aus Abbildung 6.12 a) fünf unteren Datensätzen) zeigt eine vernachlässigbare Abweichung der Mismatchfaktoren für Bandbreiten bis 10 nm. Ob diese geringe Abhängigkeit von der Auflösung auch für Solarzellen mit direktem Bandübergang und den damit verbundenen sehr steilen Flanken in der spektralen Empfindlichkeit bei hohen Wellenlängen gilt, bleibt zu untersuchen.

6.2.5 Einfluss verbesserter spektraler Verteilungen

Weiterentwicklungen bei kommerziell erhältlichen Sonnensimulatoren führen zwischenzeitlich zu erheblichen Verbesserungen in der spektralen Verteilung der Bestrahlungsstärke. Spezielle Filterung oder auch der Einsatz von mehreren unterschiedlichen Strahlungsquellen ermöglicht eine bessere Anpassung an das AM1.5G Normspektrum. Das in Abbildung 6.13 gezeigte Spektrum eines Sonnensimulators der Fa. WACOM setzt sich aus der Überlagerung zweier Strahlungsquellen zusammen. Eine Xenon-Kurzbogenlampe erzeugt die im UVVis-Bereich notwendige Strahlung, ihr IR-Anteil wird mittels eines dichroischen Spiegels herausgefiltert und durch den Strahlungsanteil eines gefilterten Halogenlampenfeldes ersetzt. Grundsätzlich wird ein Spektrum mit ähnlichen Absorptionsbanden im IR erzeugt, jedoch bleibt der zu geringe Strahlungsanteil zwischen 700-840 nm erhalten und das Überangebot im IR herkömmlicher Klasse A Xenonspektren (XAT) ist ebenfalls vorhanden. Das Spektrum eines Sonnensimulators der Fa. Pasan (vgl. [45], s. Abbildung 6.13) stammt von einem Xenon-Blitzlampen Sonnensimulator. Die Filterung wird mit einem Interferenzfilter realisiert, welcher mit starken Überschwingern das AM1.5G Spektrum nachbildet.

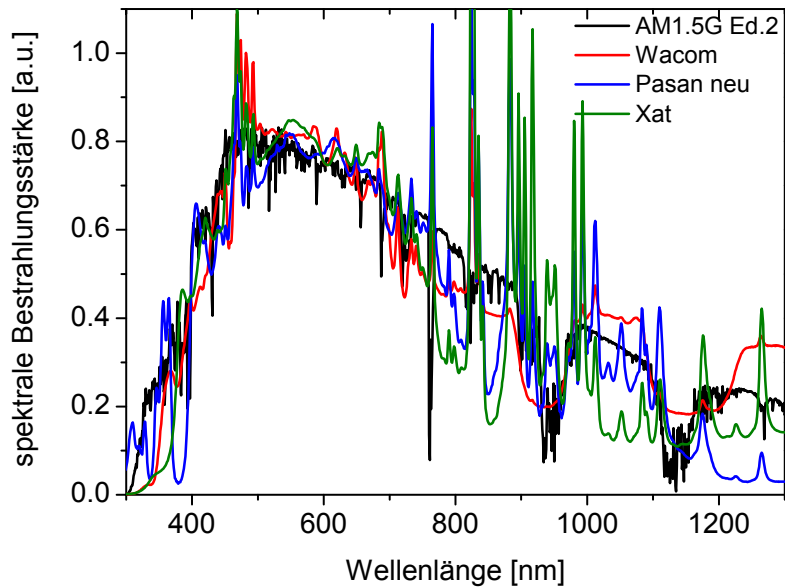


Abbildung 6.13: Spektrale Verteilungen der Bestrahlungsstärke von verschiedenen Sonnensimulatoren. Die Spektren sind unterschiedlich gut an das Normspektrum angepasst.

Nach IEC 60904-9 erfüllen alle 3 Spektren die Anforderungen für Klasse A (vgl. Tabelle 6.7). Das Xat Spektrum ist bereits mit einer maximalen Abweichung im Bereich 700-800 nm von 11.2 % sehr gut angepasst. Das Wacom Spektrum erreicht hier mit maximal 12.3 % nur eine ähnlich gute Anpassung nach IEC 60904-9. Beim Pasan Spektrum sind die Abweichungen meist vorwiegend in kleinen Wellenlängenbereichen und es erreicht bezogen auf die 100/200 nm Bereiche eine maximale Abweichung von 8.9 %.

Wellenlängen [nm]						
	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1100
Wacom	0.978	1.063	1.033	0.877	0.936	1.074
Pasan	0.911	0.999	1.033	1.035	1.000	1.034
Xat A01	0.988	1.046	1.075	0.888	0.990	0.983

Tabelle 6.7: Klassifikation der Spektralen Verteilungen nach der IEC 60904-9. Die Tabelle zeigt die Verhältnisse des Vi AM1.5g Ed.2 (2008) Standard Spektrums zu den in Abbildung 6.13 gezeigten Spektren.

Eine Verfeinerung der IEC 60904-9, um solchen Weiterentwicklungen Rechnung zu tragen, wurde bereits in Abschnitt 4.4 diskutiert.

Mit diesen Spektralverteilungen wurden Mismatchfaktoren und ihre Unsicherheiten für verschiedene Kombinationen von Solarzellen (s. Abbildung 6.5) durchgeführt, um den Einfluss der einzelnen verbesserten Spektren in der Anwendung zu beurteilen. Die Streuung der Mismatchfaktoren (für Siliciumsolarzellen) sind bei Verwendung des Pasan-Spektrums am geringsten und im Betrag sehr ähnlich. Diese liegen zwischen 0.24-0.4 %, beim Wacom-Spektrum -0.42-0.76 % und beim XAT -1.3-0.8 %. Lediglich der Mismatchfaktor mit einer gefilterten Referenzsolarzelle liegt beim Pasan-Spektrum am höchsten. Jedoch sind die Messunsicherheiten für die Mismatchfaktoren mit dem Pasan-Spektrum durchweg am geringsten.

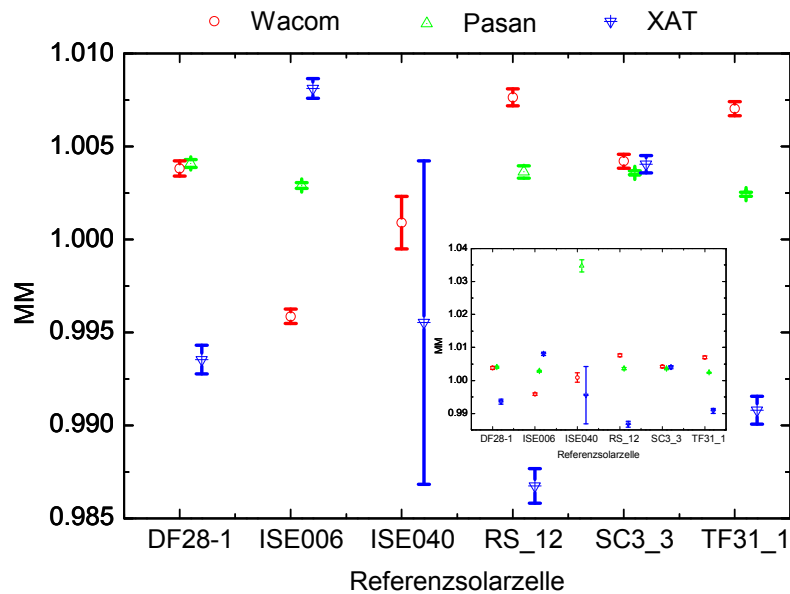


Abbildung 6.14: Berechnete Mismatchfaktoren und ihre Unsicherheiten für drei verschiedene sehr gut an das Normspektrum angepasste spektrale Verteilungen der Bestrahlungsstärke.

Beide Spektren (Wacom und Pasan) stellen eine deutliche Verbesserung der Spektralanpassung dar, sie reduzieren die Mismatchfaktoren sowohl im Betrag als auch in der Messunsicherheit. Weitere Optimierungen wie die Reduzierung des IR-Anteils beim Wacom-Spektrum stellen eine sinnvolle Fortführung der bisherigen Entwicklungsarbeiten dar und beinhalten das Potential zur weiteren Reduzierung der Messunsicherheiten.

6.3 Detailanalyse einzelner Faktoren

6.3.1 Kontaktierung großflächiger Solarzellen

Große Industriesolarzellen werden im CalLab PV Cells zur Kalibrierung an den Busbars kontaktiert. Dabei wird für die Messung der Kennlinie (des FF) eine Messung angestrebt, die den Serienwiderstand des Busbars nicht berücksichtigt. Da der gesamte Busbar das Interface der Solarzelle darstellt und in der Modulverschaltung mit einem hoch leitfähigen Cu-Metallbändchen verstärkt wird, wird die Messung der Leistung der Solarzelle üblicherweise mit Kontakteleisten durchgeführt.

Im Kalibrierlabor wird gegen verkapselte kleine Referenzzellen gemessen, daher kompensieren sich Schatten- und Reflektionseffekte an den Kontakteleisten von Referenz- und Testmessung nicht (im vgl. zur Messung in der Industrie; vgl. Abschnitt 7.7) und es müssen die Verschattungseffekte der Messleisten gänzlich vermieden werden. Die Solarzellen werden zuerst mit Hilfe von zwei Kelvinspitzen je Busbar kontaktiert.

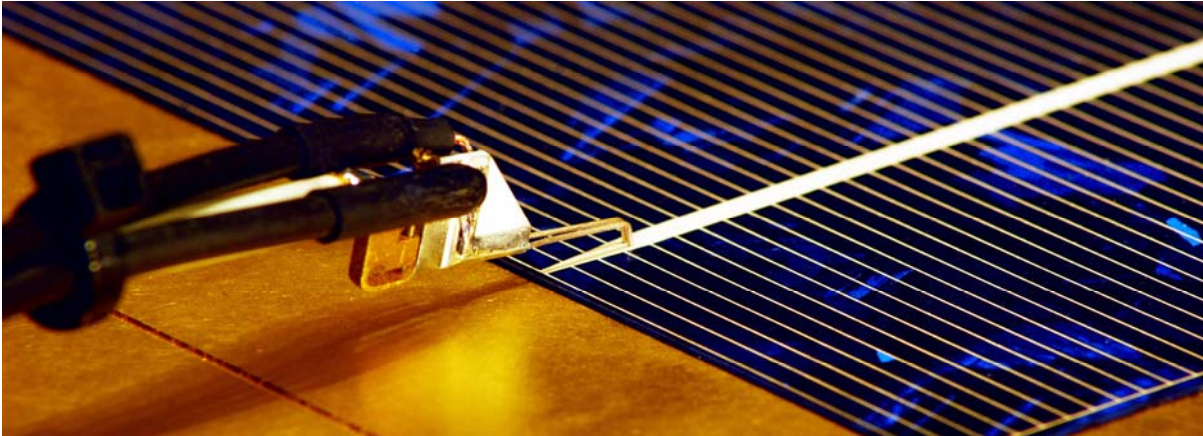


Abbildung 6.15: Kontaktierung des Busbars einer Industriesolarzelle mit einer Kelvinspitze zur verschattungsfreien Strombestimmung.

Hierdurch wird die Verschattung auf $< 0.1\%$ reduziert. Die Strommessung (I_{sc}) erfolgt mittels Vierdrahtmessung, wobei der Serienwiderstand des Busbars bei dieser Messung eine erhebliche Rolle spielt. Um die Auswirkung der Kelvin Kontaktierung an zwei Stellen eines Busbars auf die Strommessung abzuschätzen, muss der Serienwiderstand der Busbars berücksichtigt werden. Eine berechnete Spannungsverteilung ist in Abbildung 6.16 gezeigt.

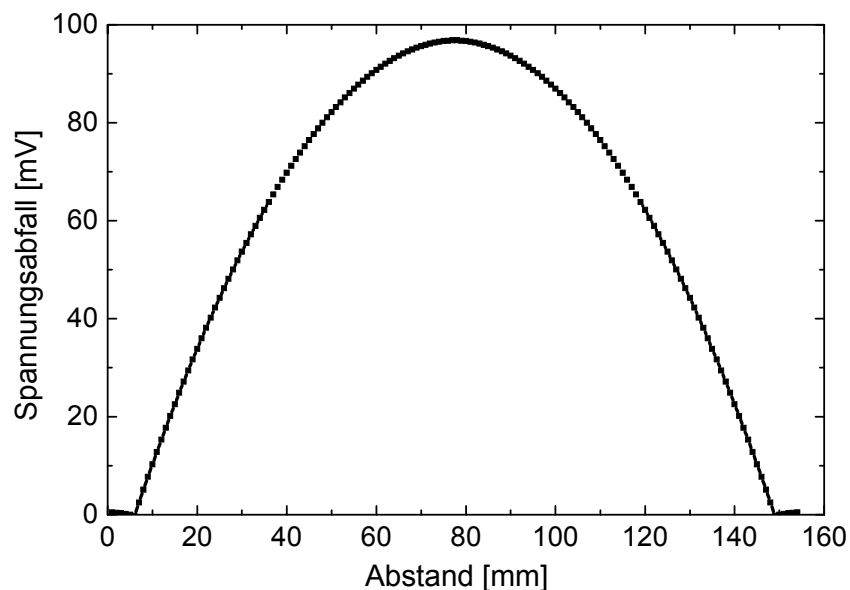


Abbildung 6.16: Berechnete Spannungsverteilung an einem Busbar einer 6“ Industriesolarzelle bei Kontaktierung mit Kelvinspitzen ca. 6 mm vom Rand. Aufgrund des hohen Serienwiderstandes des Busbars ist die Spannung in der Mitte gegenüber den Punkten am Busbar an denen der Strom abfließt ca. 100 mV höher.

Da diese Messsituation lediglich zur verschattungsfreien Bestimmung des Kurzschlussstromes genutzt wird, stellt sich die Frage nach dem Einfluss dieser inhomogenen Spannungsverteilung auf den Kurzschlussstrom. Aus der Potentialverteilung kann für jeden Punkt auf der Kurve bzw. der Solarzelle entlang des Busbars mit dem Zweiodenmodell ein Stromwert aus einer I_v -Kennlinie berechnet werden. Die Summe dieser Ströme kann nun für verschiedene Parallelwiderstände (R_p) berechnet werden. Sie spiegelt den tatsächlich gemessenen „Kurzschlussstrom“ der Solarzelle wieder. Die Abweichung dieser Ströme vom Strom bei homogener Potentialverteilung (Spannung $U = 0\text{ V}$ an jedem Punkt des Busbars) ist für verschiedene Parallelwiderstände in Abbildung 6.17 dargestellt.

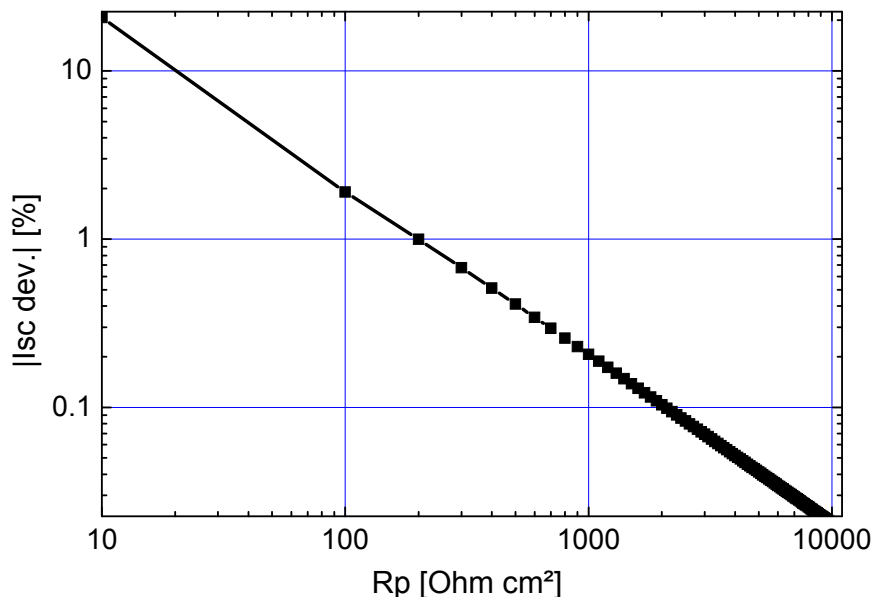


Abbildung 6.17: Betrag der Abweichung des I_{SC} bei Potentialverteilung verursacht durch nur zwei Kontaktpunkte am Rand des Busbars (vgl. Abbildung 6.16) im Vergleich zum homogenen Fall.

Hierbei können Abweichungen < 0.1 % toleriert werden. Damit sind Solarzellen mit einem Parallelwiderstand von > 2000 Ohm $\cdot\text{cm}^2$ für eine Kalibrierung akzeptabel.

Die Messung mit Kontaktleisten soll eine „busbar-freie“ Messung der IV-Kennlinie ermöglichen. Ziel ist es die Spannung zu messen, welche am Punkt der Stromentnahme vorliegt. Dazu muss die Spannungsverteilung am Busbar lateral möglichst konstant gehalten werden. Wird von 500 mV Spannung am Punkt maximaler Leistung ausgegangen, so sind < 0.5 mV Spannungsabweichung für eine Kalibrierung akzeptabel. Hierzu wird die Spannungsverteilung auf einem Busbar mit verschiedener Anzahl Kontaktstifte für die Stromabnahme berechnet.

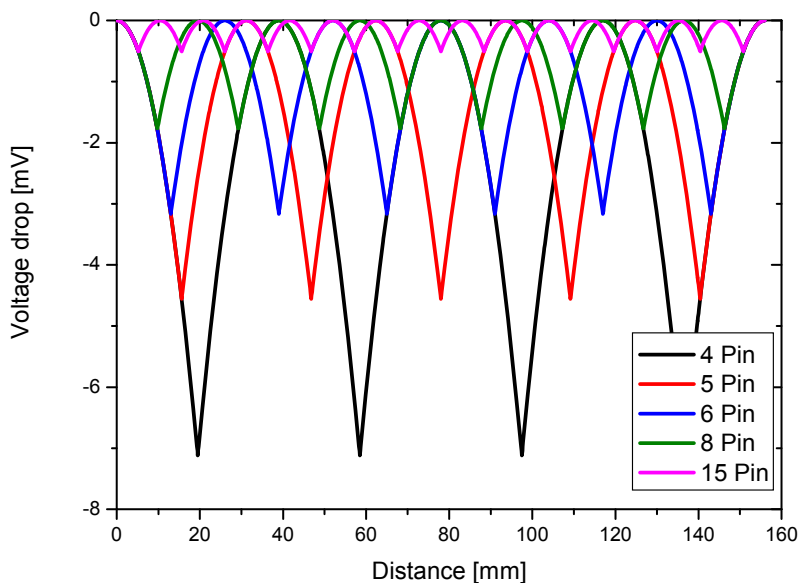
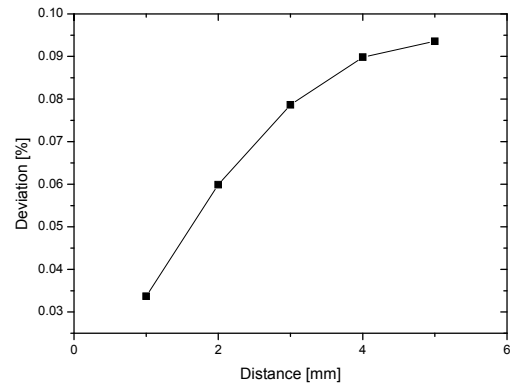
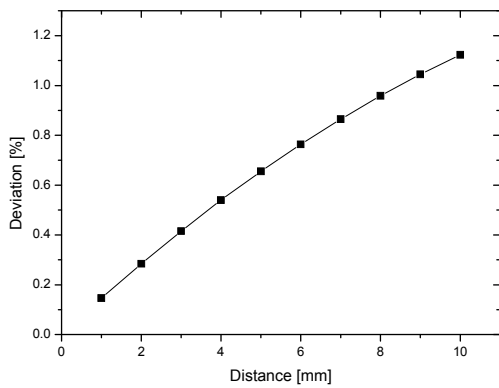


Abbildung 6.18: Spannungsverteilung an einem Busbar einer 6“ Solarzelle bei Kontaktierung mit verschiedenen Stiftkonfigurationen.

Dabei ist eine hohe Leitfähigkeit der Messleiste, welche die Stromstifte kontaktiert, Voraussetzung. Aus den in Abbildung 6.18 gezeigten Potentialverteilungen können unter Berücksichtigung des Abstandes des Spannungsmessstiftes zum Strom abnehmenden Stift die Abweichungen der gemessenen Spannung und damit der gemessenen Leistung der Solarzelle berechnet werden.



a)

b)

Abbildung 6.19: Abweichung der Spannung gemessen mit verschiedenen Abständen zum stromabnehmenden Messstift für eine 4- (a) und 15-(b))Stift Konfiguration.

Bei einem realistischen Stiftabstand von 3 mm wird mit einer Konfiguration von 15 Stiften je Busbar eine Abweichung deutlich unter 0.1 % erreicht. Da bei Inhomogenen Solarzellen größere Abweichungen auftreten können, ist eine Minimierung dieses Einflusses deutlich unter 0.1 % sinnvoll (vgl. Abschnitt 7.7).

Eine weitere Optimierung kann dadurch erreicht werden, dass der Spannungsmessstift in einem stromlosen Bereich angebracht wird. Dazu wird der Spannungsmessstift direkt zwischen ein Paar aus stromabnehmenden Stiften angebracht.

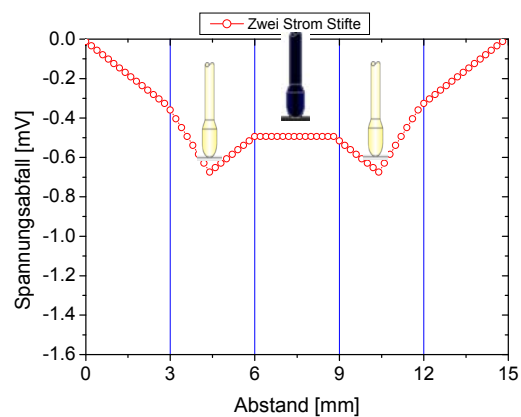
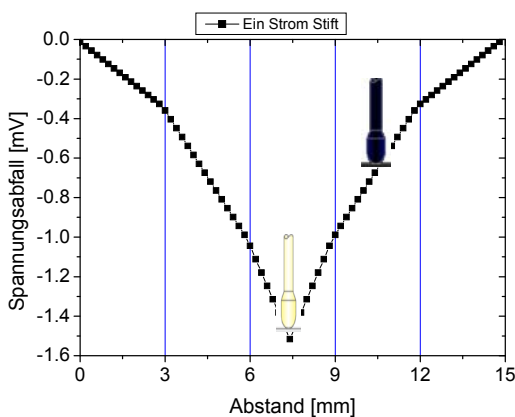


Abbildung 6.20: Vergleich einer Zwei- Stift zu einer Drei-Stift Konfiguration. Der Spannungsmessstift sitzt bei der Drei-Stift Konfiguration im quasi-stromlosen Bereich.

Damit kann der Einfluss auf die Messung der IV-Kennlinie um einen Faktor 5 reduziert werden.

6 Analyse und Minimierung der Unsicherheit für die rückführbare Messung einer IV-Kennlinie

Bei der Verwendung mehrerer Spannungsmessstifte je Messleiste ist es sinnvoll die einzelnen Stifte mit definierten Widerständen auszustatten, dadurch wird eine arithmetische Mittelung der einzelnen Spannungen, auch bei inhomogenen Potentialverteilungen, erreicht.

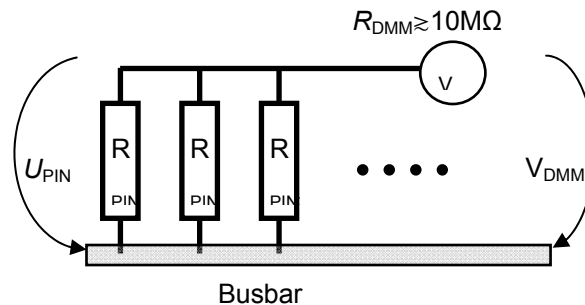


Abbildung 6.21: Spannungsmessstifte mit zusätzlichen Widerständen zur arithmetischen Mittelung der Messwerte bei inhomogenen Potentialverteilungen.

Aufgrund des hohen Innenwiderstandes der Spannungsmessgeräte sind 100 Ohm Widerstände durchaus ohne Einfluss auf die Spannungsmessung. Bei einer Konfiguration mit 15 Messstiften ergibt sich:

$$\frac{100\Omega}{15} \frac{1}{10M\Omega} \Rightarrow 0.00007\%$$

Eine solche Kontaktierung zur „busbarfreien“ Kennlinienmessung erfordert gut leitende Kontaktleisten, auf welchen die Messspitzen montiert sind. Diese Kontaktleisten verursachen Schattenwurf und auch Reflexionen. Der Schattenwurf führt zu Bereichen in der Solarzelle direkt neben dem Busbar, welche keinen (in der Realität weniger) Photostrom generieren. Diese Inhomogenität führt zu lateralen Ausgleichströmen in der Solarzelle, auch im Falle offener Klemmen (U_{OC} -Bedingung). Diese Ausgleichsströme reduzieren die Spannung an den Klemmen aufgrund der Serienwiderstände in der Solarzelle. Um solche Einflüsse zu quantifizieren wurde in Zusammenarbeit mit Daniela Grote [58] mittels Netzwerksimulationen ein Modell für eine teilverschattete Solarzelle erstellt und die Auswirkungen auf den U_{OC} und den FF bei einer Kennlinienmessung berechnet. Mittels PC1D [59] wurden lokale IV-Kennlinien berechnet und diese mit einem Netzwerkmodell für ein ausgewähltes Symmetrieelement kombiniert.

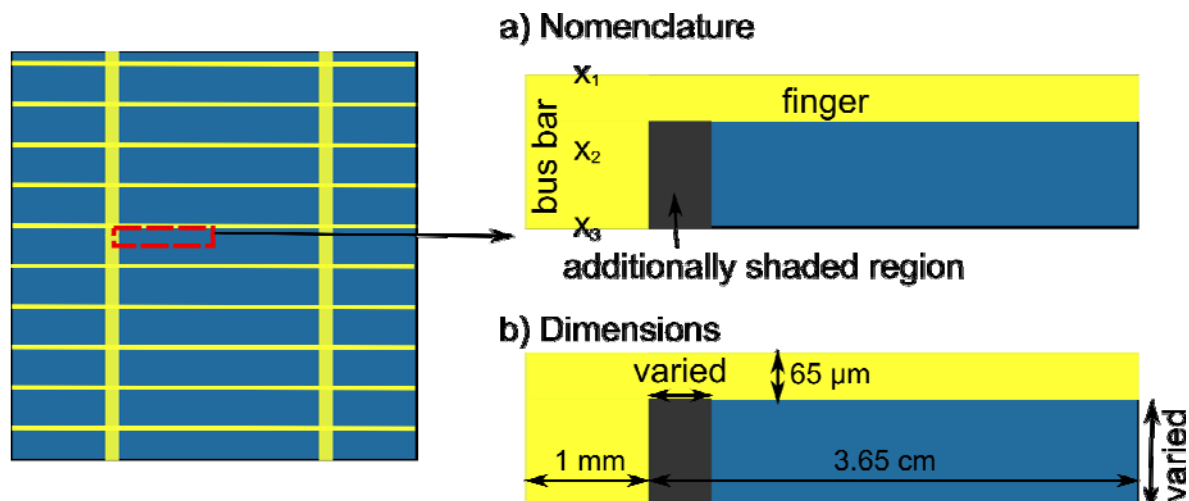
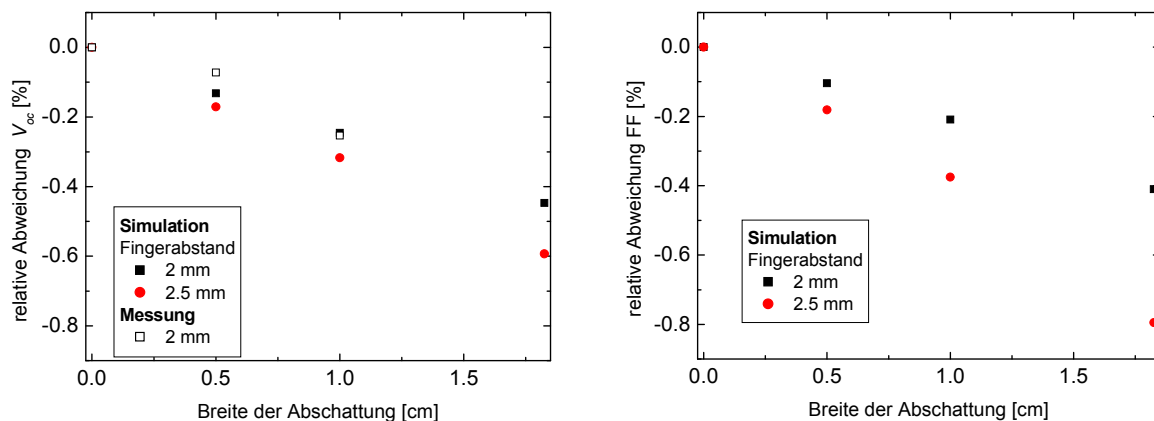


Abbildung 6.22: Darstellung des Symmetrieelementes für die Simulationsrechnung. a) Der Messpunkt zur Stromentnahme auf dem Busbar wurde an den Punkten X_1 - X_3 variiert, um dessen Einfluss zu bestimmen, b) die in der Simulation eingesetzte Geometrie. Aus [58]

In der Simulationsrechnung wurden verschiedene Parameter variiert um deren Einfluss zu ermitteln. Die Variation des Punktes zur Stromentnahme (Position der Messspitzen X_1 - X_3 in Abbildung 6.22) führt lediglich zu Unterschieden von 0.01 %. Die Variation der Fingerabstände ist in Abbildung 6.23 dargestellt. Die Abschattungen sind größer als in der realen Messsituation gewählt, um eine Messung zu ermöglichen. Da bei der Messung eine Bestimmung des U_{OC} ohne Verschattung als Referenz notwendig war, wurden die Messungen mit zwei Messspitzen je Busbar durchgeführt. Da diese Kontaktierung einen inhomogenen Zustand der Zelle bei Stromfluss bewirkt, wurden auch keine Kennlinien gemessen. Somit standen keine FF Messdaten zum Vergleich zur Verfügung.



a)

b)

Abbildung 6.23: Messung und Simulation mit unterschiedlich abgeschatteten Bereichen neben dem Busbar im Vergleich zur Messung ohne Abschattung. Aus [58].

In Abbildung 6.23 a) sind die Abweichungen der Messwerte im Vergleich zu den Simulationsergebnissen der offenen Klemmenspannung dargestellt. Messung und Simulation zeigen dieselbe Tendenz in einer sehr guten Übereinstimmung. Da im realistischen Fall einer optimierten Kontakteinheit des Kalibrierlabors die Verschattung neben dem Busbar < 1.5 mm beidseitig und < 3 mm bei einseitiger Verschattung ist, kann der Einfluss auf den gemessenen U_{OC} und FF auf 0.05 % geschätzt werden. Mit der neuentwickelten Kontakteinheit wird die Verschattung weiter deutlich reduziert, vor allem am neuen Sonnensimulator mit einer geringeren Divergenz der Strahlung ist die Verschattung lediglich am Rand der Zelle noch signifikant.

6.3.2 Erfassung der Solarzellentemperatur

Verschiedene Methoden und Prozeduren zur Erfassung der Solarzellentemperatur sind bekannt. Im Allgemeinen ist als Solarzellentemperatur die Temperatur des pn-Übergangs der Solarzelle gemeint, wobei bei WPVS-Referenzsolarzellen ein PT-100-Temperatursensor auf der Rückseite als Temperaturreferenz mittels Leitkleber angebracht ist. Bei der Kalibrierung und Verwendung einer solchen Referenz, steht die Reproduzierbarkeit der Messbedingungen im Vordergrund, somit ist die tatsächliche Temperatur der Solarzelle von geringem Interesse. Auf eine separate Kalibrierung des eingebauten Temperatursensors kann daher verzichtet werden.

6.3.2.1 Taktile Messung

Die einfachste Methode zur Erfassung der Solarzellentemperatur ist die Verwendung eines Tastsensors. Aufgrund der sehr guten Wärmeleitung eines Siliciumkristalls ist der Temperaturgradient durch die

6 Analyse und Minimierung der Unsicherheit für die rückführbare Messung einer IV-Kennlinie

Solarzelle sehr gering. Bei einer Solarzelle, welche mit geringer Leckrate des Vakuums auf einem Peltier-stabilisierten Vakuum-Messtisch (vergoldete Kupferplatte) angesaugt ist, können – bei gleichzeitiger Bestrahlung mit 1000 W/m^2 – Temperaturunterschiede von $< 0.1 \text{ K}$ zwischen Messtischoberfläche und Solarzellenoberfläche gemessen werden. Kann nicht direkt auf der Solarzellenoberfläche gemessen werden, oder ist aufgrund einer unebenen Solarzellenrückseite eine gleichmäßige Temperaturverteilung bei gleichzeitiger Bestrahlung mit 1000 W/m^2 nicht zu erwarten, so kann die Solarzelle ohne Bestrahlung temperiert werden und mittels eines schnellen Messinstruments und einer kurzzeitigen Bestrahlung die offene Klemmenspannung erfasst werden. Reagiert das Messinstrument und die Solarzelle schnell genug, so ist das Maximum dieser Messung der offenen Klemmenspannung bei STC ($25 \text{ }^\circ\text{C}$, 1000 W/m^2).

Um nun eine Temperatureinstellung unter Dauerbestrahlung zu erreichen, kann die Solarzelle selbst aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der offenen Klemmenspannung als Temperatursensor verwendet werden. Durch eine Reduzierung der Temperatur des Messtisches kann der zuvor bestimmte $U_{oc}(STC)$ und damit die Temperatur der Solarzelle, eingestellt werden. Diese Methode ist als V_{oc} -Methode bekannt (s. [60]).

Eine lateral inhomogene Verteilung der Solarzellen-Temperatur kann bei einer punktuellen Messung zu einer Fehleinschätzung der mittleren Solarzellentemperatur führen (vgl. Abbildung 6.24).

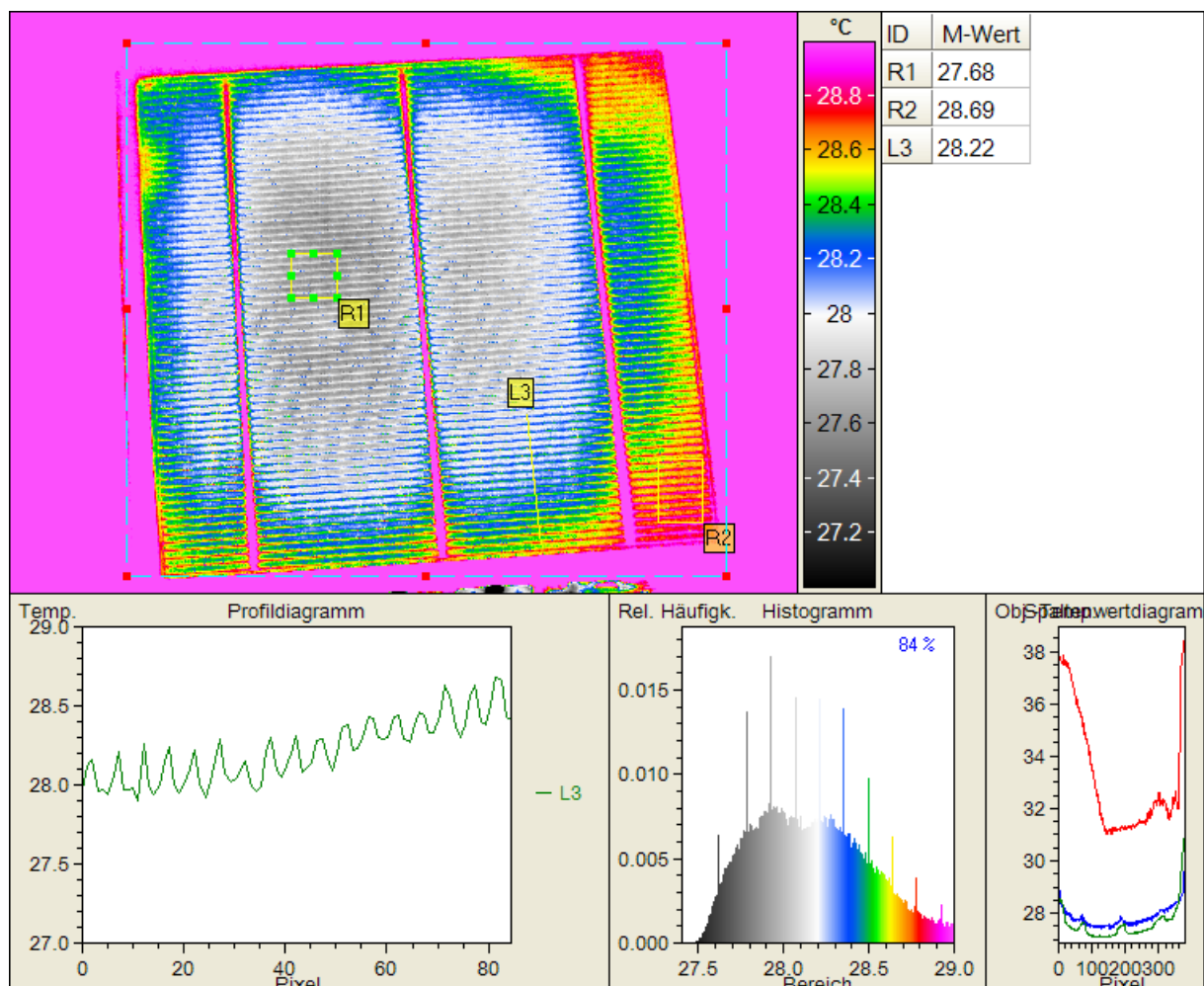


Abbildung 6.24: Temperaturverteilung einer multikristallinen Solarzelle auf dem Vakuummessblock bei 1000 W/m^2 Bestrahlungsstärke.

Daher sind Messungen der Temperatur an verschiedenen Stellen der Solarzelle notwendig um die mittlere Solarzellentemperatur zu beurteilen.

Folgende Faktoren können die Genauigkeit einer taktilen Messung der Solarzellentemperatur beeinflussen:

Ursache	Minimierung/ Vermeidung/Einfluss
Zu große Abschattung durch den Temperatursensor bei der Messung	konstruktiv, V_{OC} -Methode
Temperatureinfluss des Temperatursensorhalters	konstruktiv
Inhomogene Temperaturverteilung/-anbindung an Messtisch	V_{OC} -Methode
Rückseitiger Emitter	< 0.1 K
Kalibrierung des Temperatursensors	± 0.08 K

6.3.2.2 Radiometrische Messung

In der industriellen Umgebung mit Messraten von 2000 Solarzellen pro Stunde findet die taktilen Messung der Solarzellen keine Anwendung. Hier werden vorwiegend radiometrische Messverfahren eingesetzt. Pyranometer oder Infrarotkameras mit einem Wellenlängenbereich von 7-14 μm kommen hier zum Einsatz. Dabei werden solche Messungen an der Solarzellenvorderseite und auch an der -rückseite angewandt. Jedoch sind IR-Temperaturmessungen auch für den Laboreinsatz von Interesse. Zum einen lässt sich eine inhomogene Verteilung der Temperatur leicht erfassen, zum anderen gibt es Solarzellen mit empfindlichen Oberflächen (z.B. RSK ohne Frontdiffusion), so dass eine taktilen Messung die Solarzelle schädigen könnte.

Den größten Einfluss auf die Genauigkeit einer radiometrischen Temperaturmessung verursacht die Emissivität der Solarzellenoberfläche. Diese hängt vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit ab. Da das Siliziummaterial im relevanten Wellenlängenbereich zumindest teilweise transparent ist, beeinflusst auch die Oberfläche des Siliziummaterials an der Kontaktfläche zur Rückseitenmetallisierung die Emissivität. Des Weiteren kann sie winkelabhängig und in größeren Temperaturbereich auch temperaturabhängig sein. Bei einer radiometrischen Bestimmung der Temperatur wird angenommen, dass die Abstrahlung des zu messenden Körpers dem Planck'schen Strahlungsgesetz (Gleichung (2.1)) folgt und zumindest ein grauer Körper vorliegt.

Um die entstehenden Messunsicherheiten bei einer radiometrischen Messung abzuschätzen wurden die Emissivitäten von verschiedenen Solarzellenoberflächen bestimmt. Gelten die obigen Annahmen, so kann nach Stefan-Boltzmann (Gleichung (2.2)) die Emissivität wie folgt bestimmt werden:

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{Mess}}^4 - T_{\text{Umg}}^4}{T_{\text{Zelle}}^4 - T_{\text{Umg}}^4}. \quad (6.8)$$

Offensichtlich ist in Gleichung (6.8), dass aufgrund der Polstelle bei $T_{\text{Zelle}}^4 = T_{\text{Umg}}^4$ diese Messungen bei Solarzellentemperaturen ungleich der Umgebungstemperatur durchgeführt werden müssen. Für hohe Solarzellentemperaturen gegenüber der Umgebungstemperatur konvergiert der berechnete Wert gegen ε . Hierfür muss der Wert der Umgebungstemperatur nicht gemessen werden, sondern kann iterativ bestimmt werden.

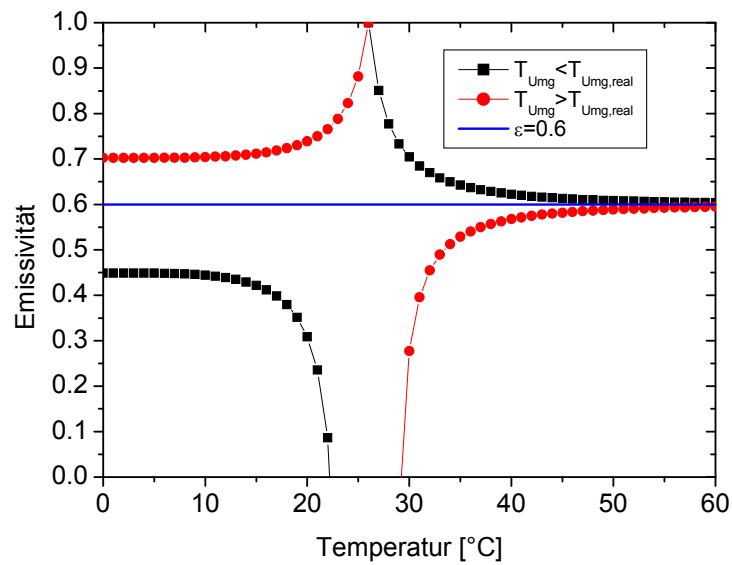


Abbildung 6.25: Berechnungen für die Bestimmung der Emissivität mit zwei verschiedenen angenommenen Umgebungstemperaturen (24 und 28°C) bei einer tatsächlichen Umgebungstemperatur von 26°C und einer vorgegebenen Emissivität von 0.6. Wird eine zu hohe Umgebungstemperatur in der Berechnung eingesetzt, so ergibt sich der rote Kurvenverlauf, bei Verwendung einer zu niedrigen Umgebungstemperatur ergibt sich die schwarze Kurve.

Bei Einsetzen einer Umgebungstemperatur in Gleichung (6.8) oberhalb der realen Umgebungstemperatur ergibt sich die rote Kurve in Abbildung 6.25, bei einer eingesetzten Umgebungstemperatur unterhalb der realen, erhält man die schwarze Kurve. Damit kann durch Variation der eingesetzten Umgebungstemperatur die tatsächliche Umgebungstemperatur bestimmt werden. Für kleine Temperaturen konvergiert das bestimmte ϵ nur gegen das reale ϵ , wenn die Umgebungstemperatur mit geringer Messunsicherheit bestimmt wurde.

Für eine temperaturabhängige Emissivität ist die Situation in Abbildung 6.26 dargestellt.

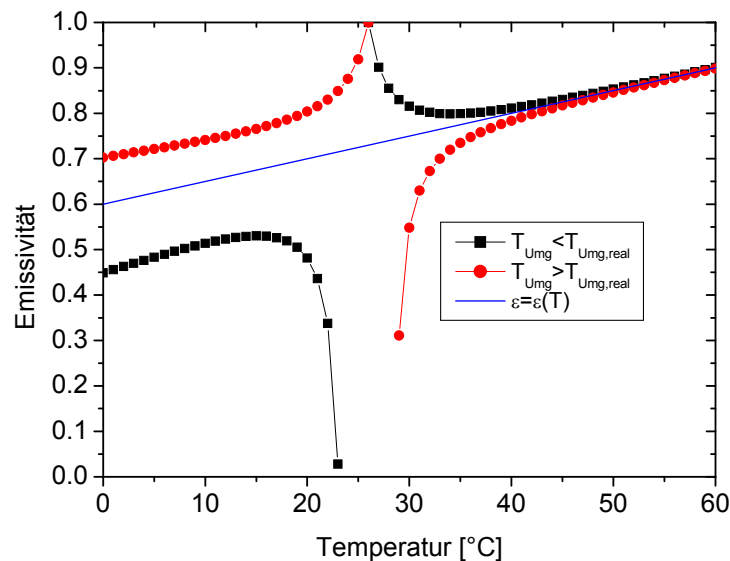


Abbildung 6.26: Berechnungen für die Bestimmung der Emissivität mit zwei verschiedenen angenommenen Umgebungstemperaturen (24 und 28°C) bei einer tatsächlichen Umgebungstemperatur von 26°C und einer temperaturabhängigen Emissivität $\epsilon(T)$.

Zur Bestimmung der Emissivitäten wurden bei verschiedenen Temperaturen Messungen durchgeführt. Dazu wurde eine Mikrobolometer-IR-Kamera (Infratec Variocam hr) mit einer Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich 7.5-14 μm verwendet. Zur Bestimmung der Messblock- und damit der Solarzellentemperatur wurde neben der Solarzelle eine schwarz lackierte Kupferplatte auf den Messblock gelegt. Zum Vergleich wurde ein kalibrierter Tastfühler verwendet. Im Ausfallwinkel wurde für die Messung eine auf ca. 20 °C wassergekühlte schwarz lackierte Metallplatte angebracht. Die Solarzelle befand sich auf einem Peltier-geregelten Messtisch (s. Abbildung 6.27). Aufgrund der ganzflächigen Aluminiummetallisierung der Solarzellenrückseite kann davon ausgegangen werden, dass die gesamte Solarzelle opak im Wellenlängenbereich der IR-Kamera ist. Für rückseitenkontaktierte Solarzellen ist dies aufgrund der Lücken in der Metallisierung nicht der Fall.

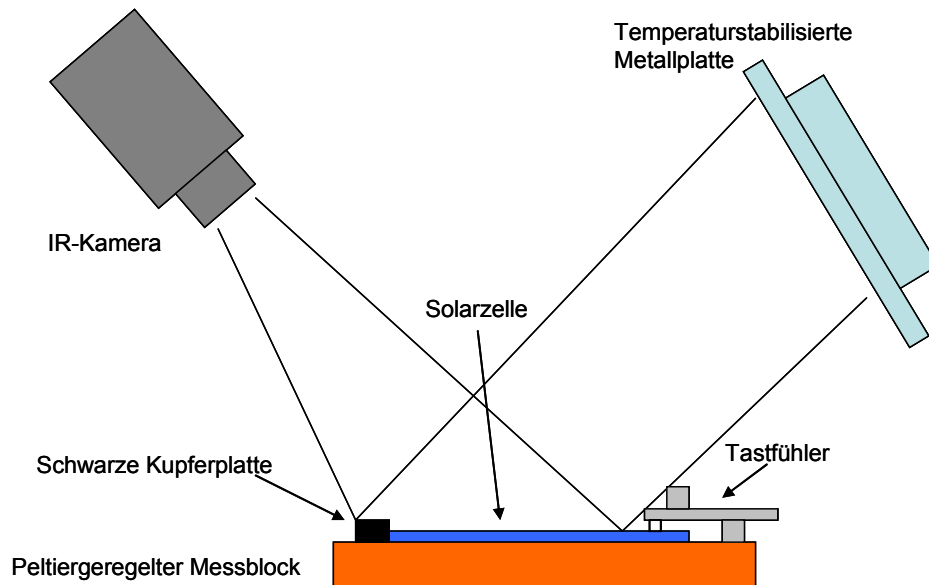


Abbildung 6.27: Schema des Messaufbaus zur Bestimmung der Emissivitäten von Solarzellen.

Bei dieser Messung muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Bereiche der Solarzelle und des als „Schwarzen Körper“ eingesetzten schwarz lackierten Kupferblocks Temperaturunterschiede von einigen 100 mK aufweisen können. Speziell bei der Messung an der Solarzellenseite können starke Temperaturinhomogenitäten auftreten. Die Solarzelle weist häufig eine starke Biegung aufgrund der Spannungen durch die unterschiedlichen Metallisierungsgrade von Vorder- und Rückseite auf, wodurch es schwierig ist die Solarzelle vollständig auf dem Vakuumtisch anzusaugen. Die Beispielrechnung in Abbildung 6.28 zeigt die Abweichung der bestimmten Emissivität aus einer Messung mit einer um ± 0.5 K abweichenden Solarzellentemperatur. Bei einer Solarzellentemperatur von 60°C liegt die so bestimmte Emissivität um 0.024 verschoben zum realen Wert.

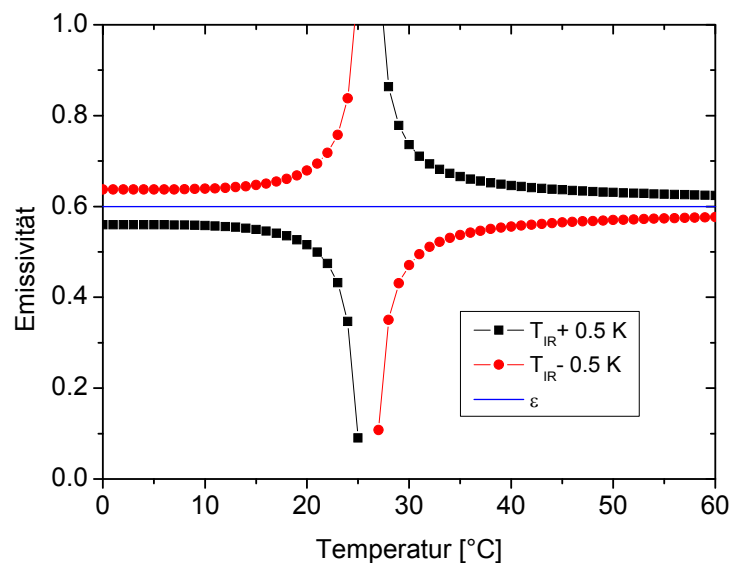
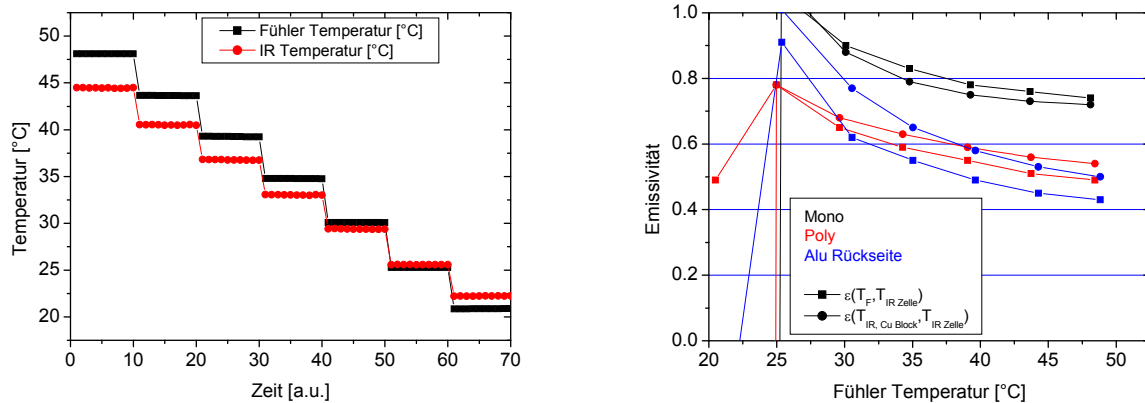


Abbildung 6.28: Berechnungen für die Bestimmung der Emissivität für Abweichungen der Kamertemperatur von der realen Strahlungstemperatur des Messobjektes bzw. Temperaturunterschiede zwischen der gemessenen Fühler- oder Schwarzkörpertemperatur und der Solarzellentemperatur von 0.5 K.

Zur Bestimmung der Emissivitäten wurde die Temperatur des Messblockes in einem Bereich von 20-50 °C geregelt. Dabei wurden bei verschiedenen Temperaturen die Messwerte der IR-Kamera an einer ca. 2x2 cm² großen Fläche der Solarzelle und einem schwarz lackierten Kupferblock verglichen. Zusätzlich wurde ein Tastfühler ausgelesen, welcher auf der Solarzellenoberfläche platziert wurde.



a) b)
Abbildung 6.29: a) Messung der Solarzellentemperatur mit einem Tastfühler und einer IR Kamera (Empfindlichkeitsbereich 7.5-14 µm). b) Bestimmung der Emissivität von Solarzellenoberflächen für verschiedene Bezugstemperaturen (Tastfühler, IR Signal eines lackierten Kupferblockes).

Abbildung 6.29 zeigt die Ergebnisse der Messungen an Industriesolarzellen. Die in Abbildung 6.29 b) auftretenden Abweichungen sind im Wesentlichen auf eine inhomogene Temperaturverteilung der Messanordnung zurückzuführen (vgl. Abbildung 6.28). Mit den so bestimmten Emissivitäten lassen sich die Auswirkungen auf die Temperaturmessung in einer industriellen Umgebung abschätzen. In der Industrie ist es häufig nicht möglich die Umgebungstemperatur der Messeinrichtung zu temperieren. Es gibt sowohl Produktionen, bei denen die Solarzellenklassierer direkt am Ende der Produktionslinie integriert sind, als auch Produktionen mit externer Zellklassierung. Tagestemperaturschwankungen von ± 5 K und Jahrestemperaturschwankungen von ± 10 K sind vor allem in Ländern mit heißen Klimaten durchaus denkbar.

Die Temperatur der Solarzellen hängt davon ab, ob diese zuvor gelagert oder direkt nach der Produktion gemessen werden. Dabei ist es wichtig, welcher Prozessschritt zur Herstellung der Solarzellen vor der Klassierung durchgeführt wurde. Beim Feuern der Metallisierung wird die Solarzelle insgesamt auf über 300°C aufgeheizt, bei der Kantenisolation ist nur eine geringfügige Erwärmung zu erwarten.

In Tabelle 6.8 sind für 3 verschiedene Emissivitäten die bestimmten Temperaturen (T_{Messung}) und deren Abweichungen zu den realen Temperaturen (T_{Zelle}) für verschiedene Umgebungstemperaturen (T_{Umgebung}) berechnet.

	Emissivitäten	Temperaturen [°C]					
T Zelle		20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0
T Umgebung		30.0	28.0	26.0	24.0	22.0	20.0
T Messung Mono	0.75	23.8	24.0	24.5	25.5	26.8	28.4
T Messung Poly	0.55	25.9	25.2	25.0	25.2	25.8	26.8
T Messung Alu Rück	0.40	27.2	26.1	25.3	24.9	24.9	25.5
diff Mono	0.75	3.8	2.0	0.5	-0.5	-1.2	-1.6
diff Poly	0.55	5.9	3.2	1.0	-0.8	-2.2	-3.2
diff Alu	0.40	7.2	4.1	1.3	-1.1	-3.1	-4.5

Tabelle 6.8: Berechnung der gemessenen Temperaturen mit einem radiometerischen Sensor bei verschiedenen Kombinationen von Umgebungs- und Solarzellentemperaturen.

6 Analyse und Minimierung der Unsicherheit für die rückführbare Messung einer IV-Kennlinie

Die verwendete Infrarotkamera Variocam hr von Infratec hat eine Temperaturlösung von 80 mK und eine absolute Genauigkeit von 1.5 K. Ein digitales Infrarot Pyranometer wie es bei Messungen in der industriellen Umgebung eingesetzt wird, hat lt. Hersteller eine Messunsicherheit von $0.5\% \pm 1$ K.

Folgende Faktoren können die Genauigkeit einer radiometrischen Messung der Solarzellentemperatur beeinflussen:

Ursache	Minimierung/ Vermeidung/Einfluss
Emissivität < 1	ε -Korrektur
Inhomogene Emissivität	
Inhomogene Temperaturverteilung/-anbindung an Messtisch	
Änderungen der Umgebungstemperatur	
Rückseitiger Emitter	< 0.1 K
Kalibrierung des Temperatursensors	± 1 -1.5 K

6.4 Weitere Messprozeduren

6.4.1 Messung von Temperaturabhängigkeiten

Die präzise Bestimmung des Temperaturverhaltens von Photovoltaikerelementen ist sowohl für die Anwendung, die Ertragsrechnung als auch für die Messung in der Produktion und im Freien bei schwankenden Umgebungsbedingungen notwendig. Die Korrektur bei Messungen mit Abweichungen von der Solltemperatur von 25°C ist in der Norm IEC 60891 [61] festgelegt. Die Messung der Temperaturabhängigkeiten erfordert SR und Kennlinienmessungen bei bis auf die Temperatur identischen Messbedingungen, daher sind einige Messunsicherheiten, die sogar die absolute Messung dominieren, hier vernachlässigbar. Die größten Beiträge bei der Bestimmung des $I_{SC}(STC)$ sind:

- der Kalibrierwert der Referenzsolarzelle
- die Degradation der Referenzsolarzelle
- die Höheneinstellung (Dickenausgleich)
- die spektrale Inhomogenität

All diese Messunsicherheiten sind für die relative Messung irrelevant. Damit erreicht man eine Messunsicherheit von $U_{95}(I_{SC}) = 0.3$ %.

Da bei der Bestimmung der Solarzellenspannung die Messunsicherheit der Temperaturmessung dominiert ist hier die Messunsicherheit gleich der bei der STC-Messung ($U_{95}(U) = 0.3$ %). Die kombinierte Messunsicherheit für den P_{MPP} liegt damit bei $U_{95}(P_{MPP}) = 0.77$ %.

Tk-Prozedur 2010

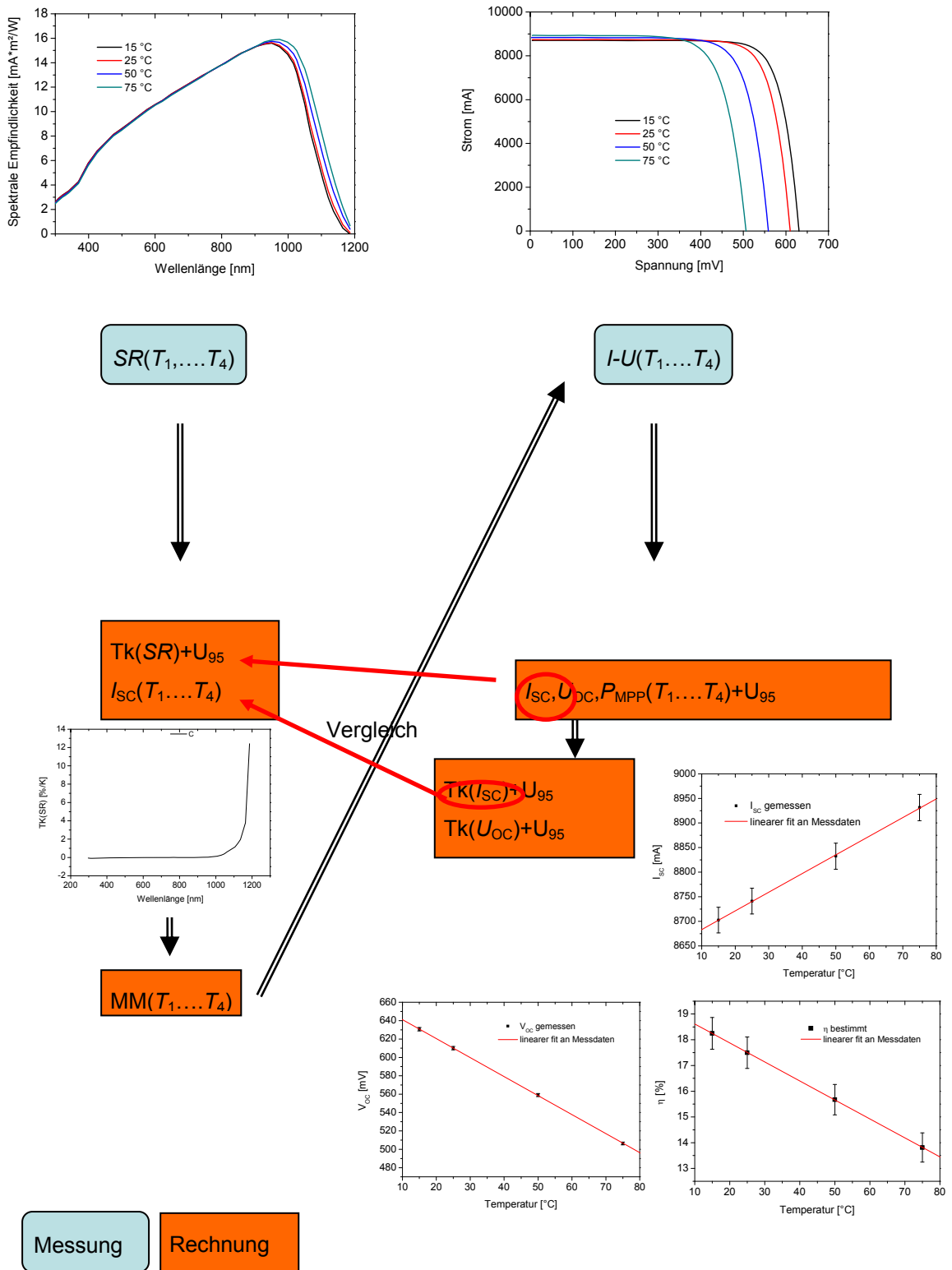


Abbildung 6.30: Messprozedur zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeit von Solarzellen. Die Fehlerbalken in den IV-Parameter Diagrammen beziehen sich auf die Messunsicherheiten bezüglich der Reproduzierbarkeit der Messwerte, da die Temperaturkoeffizienten nur von den relativen Messunsicherheiten abhängen ($U_{rel}(I_{SC})=0.3\%$, $U_{rel}(U_{OC})=0.3\%$, $U_{rel}(P_{MPP})=0.77\%$).

6 Analyse und Minimierung der Unsicherheit für die rückführbare Messung einer IV-Kennlinie

Bei der bisher üblichen Messprozedur wurde der Einfluss der Temperatur auf die spektrale Empfindlichkeit und damit auf den spektralen Mismatch vernachlässigt. Da der Temperaturkoeffizient des I_{SC} sehr gering ist wirkt sich dies jedoch mit ca. 2/3 der gesamten Messunsicherheit auf den $Tk(I_{SC})$ aus. Der Gewinn an Genauigkeit ist in Tabelle 6.9 für eine typische Industriesolarzelle dargestellt.

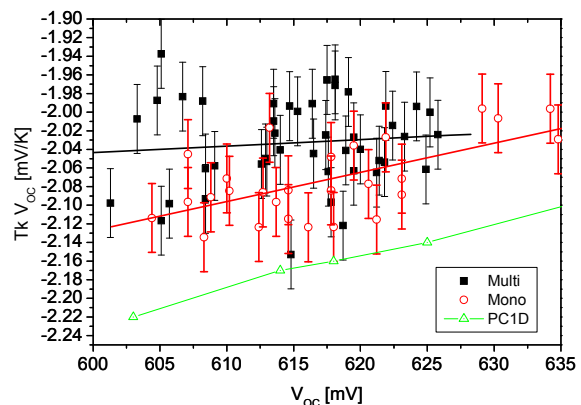
	I - U -Para.(STC)	T_k	$U_{95}(T_k)$	T_k	$U_{95}(T_k)$
I_{SC} [mA]	8751	3.10	2.14	0.035%	0.024%
U_{OC} [mV]	607	-2.23	0.07	-0.368%	0.011%
P_{MPP} [mW]	4011	-18.14	1.44	-0.452%	0.036%
Berücksichtigung der T-Abhängigkeit des MM-Faktors					
I_{SC} [mA]	8751	3.14	0.97	0.036%	0.011%
P_{MPP} [mW]	4011	-17.95	1.10	-0.448%	0.027%

Tabelle 6.9: Messung der Temperaturabhängigkeit der Kennlinienparameter einer Industriesolarzelle. Wird die Temperaturabhängigkeit des spektralen Mismatch mitberücksichtigt, reduziert sich die Gesamtmessunsicherheit deutlich.

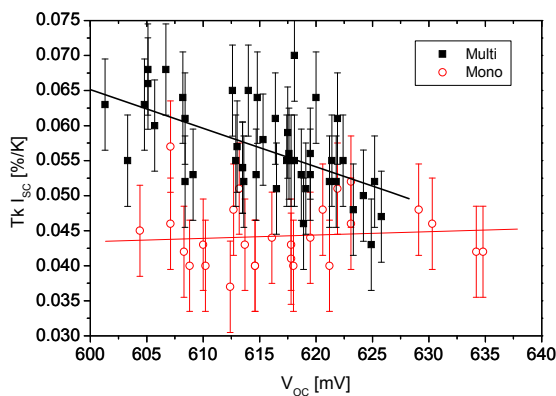
Mit der neuen Messprozedur wird die Unsicherheit auf den T_k des I_{SC} deutlich (auf 1/3) reduziert. Die Messunsicherheit des Temperaturkoeffizienten der Spannungsmessung ist von der Temperaturmessung selbst dominiert und damit fast identisch wie bei der Absolutmessung. Somit sinkt für die neue Messprozedur die Unsicherheit des P_{MPP} für eine relative Messung auf 0.77 %. Der lineare Fit an exemplarische Werte unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten ergibt eine Messunsicherheit von 1/20 auf den Temperaturkoeffizienten des P_{MPP} . Der gemessene Temperaturbereich wurde an die neue Norm für die Ertragsbewertung von Modulen IEC 61853 [62] angepasst. Die Erweiterung des Messbereiches von bisher 50°C auf 75°C halbiert diese Messunsicherheiten nochmals.

Die Messergebnisse für Temperaturkoeffizienten für mehr als 70 Industriesolarzellen sind in Abbildung 6.31 zusammengestellt.

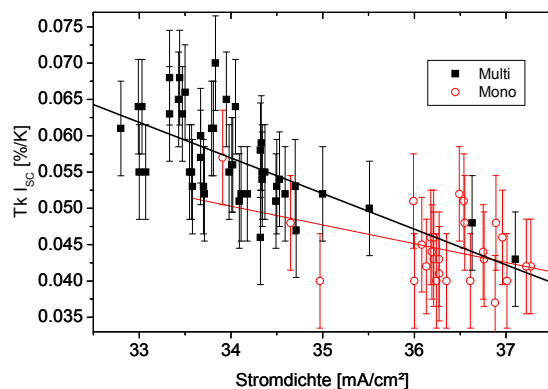
Abbildung 6.31: Messwerte mit Messunsicherheiten von Temperaturkoeffizienten von über 70 Industriesolarzellen nach mono-Si und mc-Si getrennt aufgetragen im Vergleich zu dem mittels PC1D simulierten Werten (vgl. Abschnitt 2.3).



a)



b)



c)

Die Temperaturkoeffizienten für die Spannung liegen zwischen -1.94 und -2.16 mV/K und nehmen mit zunehmender Offenenklemmenspannung der Solarzelle leicht ab. Die mit den Modellen in Abschnitt 2.3 errechneten Werte liegen z.T. deutlich darüber (vgl. auch Abbildung 2.7).

Der Temperaturkoeffizient des Stromes liegt bei Modellrechnungen im Bereich von 0.035-0.045%/K. Damit lassen sich die hohen Werte für multikristalline Solarzellen in den obigen Grafiken (

Abbildung 6.31 b)-c)) nicht erklären.

Mit einer Veränderung der Eingangsparameter (bzw. deren Temperaturmodelle) in die Solarzellenmodelle (vgl. Abschnitt 2.3) lassen sich zwar die Temperaturkoeffizienten des U_{OC} und des I_{SC} verschieben. Die Änderung des Temperaturmodells der intrinsischen Ladungsträgerdichte (Gleichung (2.24)) oder auch der Mobilitäten beeinflusst die Temperaturkoeffizienten ($Tk(U_{OC})$ und $Tk(I_{SC})$) mit gleichem Vorzeichen. Somit kann zunächst keine einfache Erklärung für diese Abweichungen gefunden werden.

Mit Hilfe der Temperaturkoeffizienten lassen sich die Kennlinien auf eine beliebige Temperatur korrigierten. Die Korrektur der I-U-Kennlinien auf die Werte von 25°C unter Berücksichtigung der Temperaturkoeffizienten des Stromes und der Spannung vernachlässigt zunächst Temperatureinflüsse auf die Kennlinie (s. Abbildung 6.32) im Bereich des Punktes maximaler Leistung (P_{MPP}). Diese können dann durch Bestimmung des Kennlinienkorrekturfaktors κ (vgl. [61]) berücksichtigt werden. Die Abweichungen im Bereich der Offenen-Klemmenspannung für hohe Temperaturen in Abbildung 6.32 sind vermutlich die Folge einer linearen Korrektur und der zunehmenden Abweichung von dieser Linearität mit steigender Temperatur. Vergleiche hierzu auch [22].

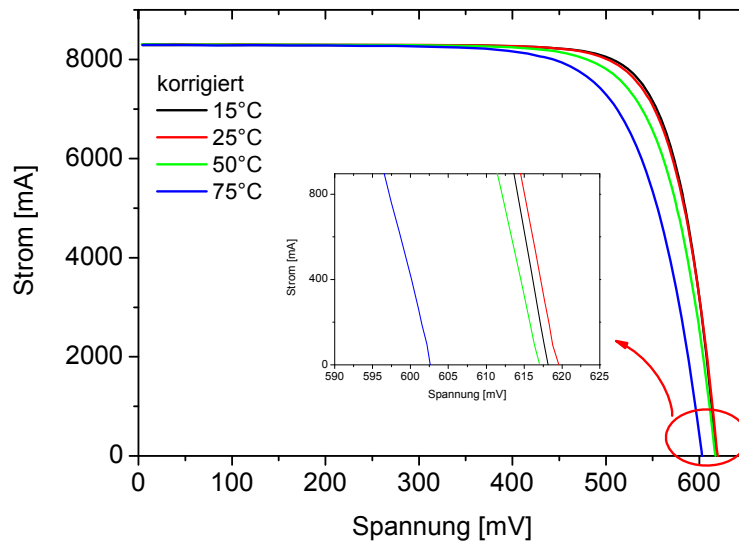


Abbildung 6.32: IV-Kennlinien einer multikristallinen Solarzelle gemessen bei unterschiedlichen Solarzellentemperaturen, korrigiert auf 25°C. Die Abweichung in der Spannung zeigt, dass die Temperaturkoeffizienten bei hohen Temperaturen nicht konstant sind.

6.4.2 Messprozedur für Einfachsolarezellen mit einem Mehrlichtquellensimulator und Monitorprinzip

Beim Sonnensimulator mit einer Strahlungsquelle wird eine Monitorzelle mit möglichst guter Spektralanpassung an die zu messenden Testzellen ausgewählt. Zur besseren Anpassung der spektralen Verteilung eines Sonnensimulators an das AM1.5g Normspektrum im Wellenlängenbereich 700-1200 nm wurden auch Simulatoren mit 2 Strahlungsquellen entwickelt. Sollen Solarzellen mit einem pn-Übergang gemessen werden, so besteht die Möglichkeit mit einer oder zwei Monitorzellen zu arbeiten. Bei einer Monitorzelle würde man wie beim einfachen Sonnensimulator eine an die Solarzelle spektral angepasste Monitorzelle verwenden. Mit zwei spektral an die Strahlungsquellen angepassten Monitorzellen könnte man jedoch die Strahlungsschwankungen für beide Quellen getrennt erfassen. Der neue Sonnensimulator mit zwei Strahlungsquellen im CalLab PV Cells ist mit einer Xenon-Kurzbogenlampe für den Bereich bis 700 nm und einem Halogenlampenfeld für den langwelligen Spektralbereich ausgestattet. Halogenlampen strahlen sehr ruhig und fluktuationsarm bei Verwendung einer geregelten Stromversorgung. Bei Xenon-Kurzbogenlampen dagegen lassen sich, trotz zusätzlicher Verwendung einer optisch-elektrischen Rückkopplung, Schwankungen in kurzen und längeren Zeitskalen nicht ganz unterdrücken. Daher ist es sinnvoll diese beiden sehr unterschiedlichen Strahlungsquellen getrennt zu überwachen und dies in die Messprozedur nach dem Monitorprinzip einzubinden.

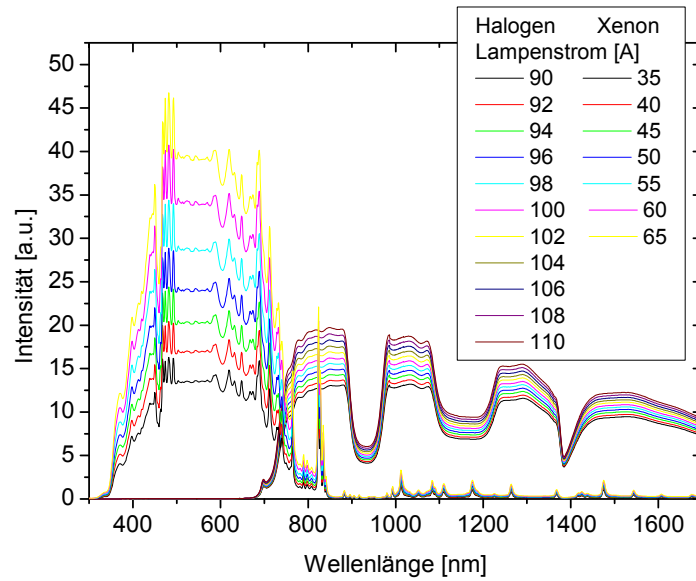


Abbildung 6.33: Spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke der einzelnen Strahlungsquellen des Zweilichtquellen-Sonnensimulators.

Die Einstellung der Strahlungsleistung mit einer kalibrierten Referenzsolarzelle muss für beide Strahlungsquellen getrennt erfolgen. Dabei ist es notwendig eine Strahlungsquelle mit einer Blende völlig auszublenden. Die Strahlungsleistung der ersten Strahlungsquelle und damit der Kalibrierwert der Referenzsolarzelle I_{R1} wird wie folgt festgelegt:

$$I_{R1} = \int_0^X E_{AM1.5G}(\lambda) SR_{RC}(\lambda) d\lambda$$

mit der Strahlungsleistung (6.9)

$$G_1 = \int_0^X E_{AM1.5G}(\lambda) d\lambda$$

und SR_{RC} : spektrale Empfindlichkeit der Referenzsolarzelle.

Der Schnittpunkt der beiden Spektren (s. Abbildung 6.33) definiert X. Somit kann dann die Strahlungsintensität G_1 der ersten Strahlungsquelle mittels des berechneten Stromes der Referenzsolarzelle I_{R1} eingestellt und der zugehörige Monitorwert U_{Mon} bestimmt werden:

$$U_{Mon1,R} = U_{Mon1,M} \frac{I_{R1}}{I_{R1,M}}$$
(6.10)

Die zweite Strahlungsquelle kann dann additiv zur ersten eingestellt werden:

6 Analyse und Minimierung der Unsicherheit für die rückführbare Messung einer IV-Kennlinie

$$U_{\text{Mon2,R}} = U_{\text{Mon2,M}} \frac{I_{\text{R2}}}{I_{\text{R2,M}}} \quad \text{mit} \quad (6.11)$$

$$I_{\text{R2}} = \int_0^{\infty} E_{\text{AM1.5G}}(\lambda) SR_{\text{RC}} \partial\lambda = I_{\text{R1}} + \int_X^{\infty} E_{\text{AM1.5G}}(\lambda) SR_{\text{RC}} \partial\lambda$$

I_{R2} entspricht dabei dem Kalibrierwert der Referenzsolarzelle. Wobei etwaige Abweichungen der bereits justierten (ersten) Strahlungsquelle berücksichtigt werden müssen, somit erweitert sich Gleichung (6.10) zu:

$$U_{\text{Mon2,R}} = U_{\text{Mon2,M}} \frac{I_{\text{R2}}}{I_{\text{R2,M}}} \frac{U_{\text{Mon1,R}}}{U_{\text{Mon1,M}}} \quad (6.12)$$

Damit hat man den Sonnensimulator auf die Strahlungsintensität der Referenzsolarzelle bzgl. AM1.5g eingestellt.

Zur Optimierung der spektralen Verteilung hinsichtlich Ähnlichkeit mit dem Normspektrum für eine bestimmte spektrale Empfindlichkeit lässt sich analog zu Abschnitt 3.3 ein Anpassungsindex für die spektrale Verteilung des Sonnensimulators definieren:

$$\Delta J_E = \int |\Delta J(\lambda)| \partial\lambda = \int \left| \left(\frac{E^{\text{SIM}}(\lambda)}{\int E^{\text{SIM}}(\lambda) \partial\lambda} - \frac{E^{\text{STC}}(\lambda)}{\int E^{\text{STC}}(\lambda) \partial\lambda} \right) SR(\lambda) \right| \partial\lambda \quad (6.13)$$

Hierbei besteht E^{SIM} aus der Superposition zweier Spektren:

$$E^{\text{SIM}}(\lambda) = E_1^{\text{SIM}}(\lambda) + E_2^{\text{SIM}}(\lambda) = c_1 e_1^{\text{SIM}}(\lambda) + c_2 e_2^{\text{SIM}}(\lambda) \quad (6.14)$$

Die Optimierung erfolgt nun unter Variation der spektralen Anteile e_1 und e_2 durch die Koeffizienten c_1 und c_2 mit dem Ziel der Minimierung von ΔJ_E . Dabei gilt die Randbedingung:

$$1000 \text{ W} / \text{m}^2 = G = \int_0^{\infty} E_{\text{SIM}}(\lambda) \partial\lambda \quad (6.15)$$

Ist nun die optimale Spektralverteilung gefunden, so wird der spektrale Mismatch nach Gl. (3.32) berechnet. Die Nachjustierung der Intensität zur Korrektur des spektralen Mismatch oder auch zur Inhomogenitätskorrektur muss für beide Strahlungsquellen gleichermaßen erfolgen, um die relative Spektralverteilung nicht zu verändern.

$$V_{\text{Mon1/2,R,korr}} = V_{\text{Mon1/2,R}} \frac{f_h}{M} \quad (6.16)$$

Da die Strahlung des Sonnensimulators von mehreren Strahlungsquellen erzeugt wird, ist davon auszugehen, dass eine inhomogene spektrale Verteilung vorliegt. Da die Inhomogenität $f_h^{1,2}$ und die spektrale Verteilung beider Strahlungsquellen (1, 2) getrennt gemessen werden kann, und die spektrale Empfindlichkeit der Testsolarzelle (SR^{TC}) i.A. ebenfalls bekannt ist, kann die Inhomogenität auch getrennt korrigiert werden. Dazu wird der Gesamtinhomogenitätskorrekturfaktor definiert:

$$f_h = f_h^1 f_h^2 \quad (6.17)$$

Und die Gewichtungsfaktoren $t_{1/2}$ definiert.

$$f_h^{1,2} \frac{\int SR^{TC}(\lambda) E^{SIM1/2}(\lambda) d\lambda}{\int SR^{TC}(\lambda) [E^{SIM1/2}(\lambda) + E^{SIM2/1}(\lambda)] d\lambda} = f_h^{1,2} \frac{\int SR^{TC}(\lambda) e^{SIM1/2}(\lambda) d\lambda}{\int SR^{TC}(\lambda) e^{SIM}(\lambda) d\lambda} = f_h^{1,2} t_{1/2} \quad (6.18)$$

Auch die Korrektur der Strahlungsschwankungen und Abweichungen von den Referenzmonitorwerten wird mit $t_{1/2}$ gewichtet:

$$korr_{1/2, Mon} = \frac{U_{Mon1/2, R, korr}}{U_{Mon1/2, M}} t_{1/2} \quad (6.19)$$

Damit erhält man für die Strommessung folgende Modellgleichung:

$$I_{SC} = I_{TC, R} = \frac{U_{TC}}{U_{Mon1, TC, M} U_{Mon2, TC, M}} \frac{R_{RC, M}}{R_{TC, M}} \frac{f_h^1 f_h^2}{M} \frac{U_{Mon1, RC, R} U_{Mon2, RC, R} I_{RC, R2}}{U_{RC}} t_1^2 t_2^2 \quad (6.20)$$

Bei der Kalibrierung mit einer breitbandigen, an die Testsolarzelle spektral angepassten Referenzsolarzelle, werden die zwei Strahlungsquellen getrennt eingestellt und mit dem Monitorprinzip getrennt überwacht (und korrigiert). Daher unterliegt das Verhältnis der beiden Intensitäten G_1/G_2 einer gewissen Unsicherheit bei der Messung und dies muss in der gesamten Messunsicherheit berücksichtigt werden.

Prinzipiell ist es möglich die Referenzierung auch auf so genannte Komponentenreferenzsolarzellen zu beziehen, welche spektral an die Strahlungsquellen angepasst sind (vergleichbar mit den Monitorzellen der oben beschriebenen Prozedur). Hierbei ist jedoch bei der Übertragung der Messunsicherheiten der spektrale Mismatch zwischen zwei zur Testsolarzelle stark unterschiedlichen Referenzsolarzellen zu berücksichtigen:

$$I_{SC} = I_{TC, R} = \frac{U_{TC}}{U_{Mon1, TC, M} U_{Mon2, TC, M}} \frac{R_{RC, M}}{R_{TC, M}} \frac{f_h^1 f_h^2}{M_1 M_2} \frac{U_{Mon1, RC, R} U_{Mon2, RC, R} I_{RC, R1} I_{RC, R2}}{U_{RC}} t_1^2 t_2^2 \quad (6.21)$$

Die Messunsicherheiten des spektralen Mismatch spektral unterschiedlicher Solarzellen sind in Abschnitt 6.2.1 eingehend diskutiert.

6.5 Verbesserungspotential

Die in Abschnitt 6.2 entwickelten Methoden erlauben es die Auswirkungen der einzelnen Komponenten auf den spektralen Mismatch zu ermitteln. Damit ist man nun in der Lage gezielt Verbesserungen bei allen spektral aufgelösten Messverfahren durchzuführen. Die zu erwartenden Auswirkungen können anhand der Daten und Berechnungen in Abschnitt 6.2.5 abgeschätzt werden. Diese Methoden eigenen

sich vor allem auch zur Bewertung und Verbesserung der Kalibrierung von Dünnschicht-Technologien, welche meist stark variierende spektrale Eigenschaften aufweisen.

Die Kontaktierung von Solarzellen mit Standardmetallisierung (2 oder 3 Busbar) ist hinreichend verstanden. Begrenzt werden die obigen Betrachtungen lediglich durch starke Variationen in der Leitfähigkeit der Metallisierung. Neue Solarzellenkonzepte kommen ohne Busbar als eindeutig definiertes elektrisches Interface aus und stellen daher neue Anforderungen an die Kontaktierung.

In die Messung der Temperaturkoeffizienten gehen nur wenige Messunsicherheiten ein, da es sich um eine relative Messung handelt. Die größten verbleibenden Messunsicherheiten sind der spektrale Mismatch (0.2 %), der Temperaturdrift der Monitorzelle (0.12 %) und die Standardabweichung der Messung (0.16 %) für die Strommessung. Eine Überarbeitung des Messplatzes könnte hinsichtlich der letzten zwei Einflussfaktoren noch eine Verbesserung ermöglichen. Die Messunsicherheit des spektralen Mismatch wird in Abschnitt 6.2.1 diskutiert.

Bei der Spannungsmessung kommen die Messunsicherheiten im Wesentlichen von der Temperaturmessung und unterscheiden sich hierbei nur unwesentlich von der absoluten Bestimmung des U_{OC} (s. Abschnitt 6.1.2).

6.6 Zusammenfassung

Abschnitt 6.1 fasst alle Einflussfaktoren auf die Messung der IV-Kennlinie zusammen. In Abschnitt 6.2 werden die Auswirkungen der Eingangsgrößen auf den spektralen Mismatch untersucht. Dazu wurde eine Methode entwickelt, welche es erlaubt, aus den spektral abhängigen Messunsicherheiten der Eingangsgrößen eine Messunsicherheit für den integral bestimmten Mismatch zu ermitteln. Dabei wurden mittels Random Walks die spektralen Empfindlichkeiten der Test- und der Referenzsolarzelle und die spektrale Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators innerhalb ihrer Messunsicherheiten 10000-fach variiert und daraus 10000 Mismatchfaktoren berechnet. Die Breite dieser Verteilung von Mismatchfaktoren wird als Abschätzung für dessen Messunsicherheit verwendet. Zusätzlich dazu wurde eine Sensitivitätsanalyse entwickelt, mit welcher die für die Mismatchbildung signifikanten Wellenlängenbereiche ermittelt werden können. Hiermit ist eine Grundlage für eine gezielte Verbesserung von Spektralverteilungen von Sonnensimulatoren geschaffen

Weitere Betrachtungen zur Kontaktierung von unverkapselten Solarzellen ermöglichten die Entwicklung von Kontakteinheiten zur homogenen und vergleichbaren Messung der IV-Kennlinien.

Die in Abschnitt 6.3.2.2 durchgeführten Messungen und Berechnungen zur Temperaturbestimmung in der industriellen Umgebung zeigen die Grenzen der Temperaturmessung mittels IR-Sensorik an Solarzellenoberflächen.

Im Weiteren wurden die präzise Bestimmung der Temperaturkoeffizienten von Solarzellenparametern und die Messung mittels Mehrlichtquellensimulator mit Monitorprinzip entwickelt. Die Messunsicherheitsbestimmung für die Temperaturkoeffizienten zeigt deutliche Verbesserungen durch die Berücksichtigung des temperaturabhängigen Mismatchfaktors.

7 Referenzzellenentwicklung

Kalibrierungen direkt gegen nationale Normale können nur in sehr begrenztem Umfang durchgeführt werden. Daher werden bei jeglichen Kalibrierungen Transfornormale eingesetzt. Die Eigenschaften dieser Transfornormale müssen an ihren Einsatz angepasst sein, um geringe Messunsicherheiten zu ermöglichen. Dieses Kapitel fasst die Untersuchungen der optischen und elektrischen Eigenschaften für die am ISE entwickelten WPVS-Referenzsolarzellen zusammen und zeigt eine Übersicht über die spektrale Anpassung verschiedener Referenzsolarzellen an unterschiedliche Dünnschichtsolarzellen. Ebenfalls ist die Entwicklung eines Transfornormals mit großen Industriesolarzellen dargestellt.

7.1 Verwendung von Referenzsolarzellen

Um die Einstrahlung gemäß Standard Testbedingungen zu ermitteln werden kalibrierte Solarzellen verwendet. Solche Referenzsolarzellen werden gegen nationale Normale primär kalibriert oder auch als sekundär kalibrierte Referenzsolarzellen eingesetzt. Für primär kalibrierte Referenzsolarzellen gab es in der Vergangenheit internationale Rundvergleiche [63] aus denen hervorgeht, dass Abweichungen der Kalibrierwerte im Prozentbereich - selbst bei Einschränkung der Teilnehmer auf erfahrene Messlabors - durchaus auftreten. Der letzte Messvergleich (2004) wurde als Sternvergleich mit der PTB als Pilotlabor durchgeführt. Die Abweichungen zum Pilotlabor sind in Abbildung 7.1 aufgetragen.

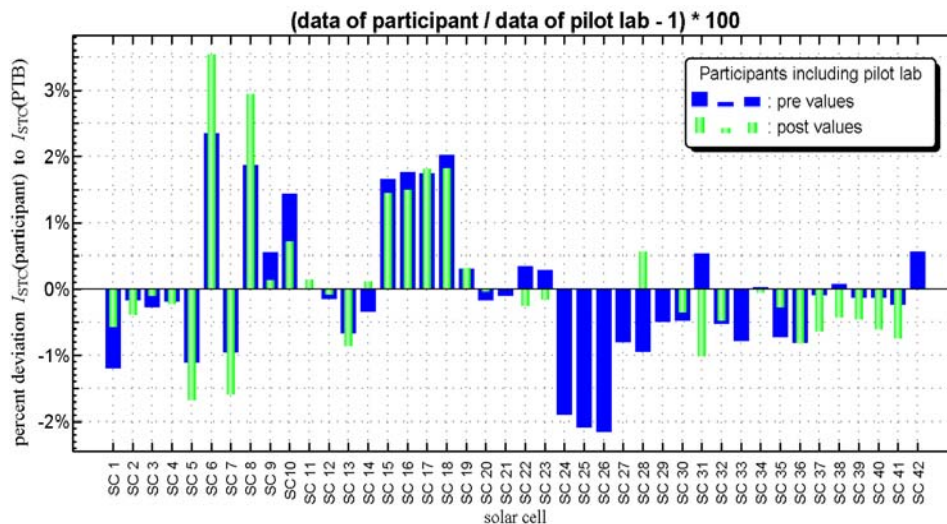


Abbildung 7.1: Auswertung der Messabweichungen beim WPVS Rundvergleich 2004

Das Fraunhofer ISE Callab PV Cells hat einen Bestand an Referenzzellen mit verschiedenen spektralen Empfindlichkeiten (s. Abbildung 7.2).

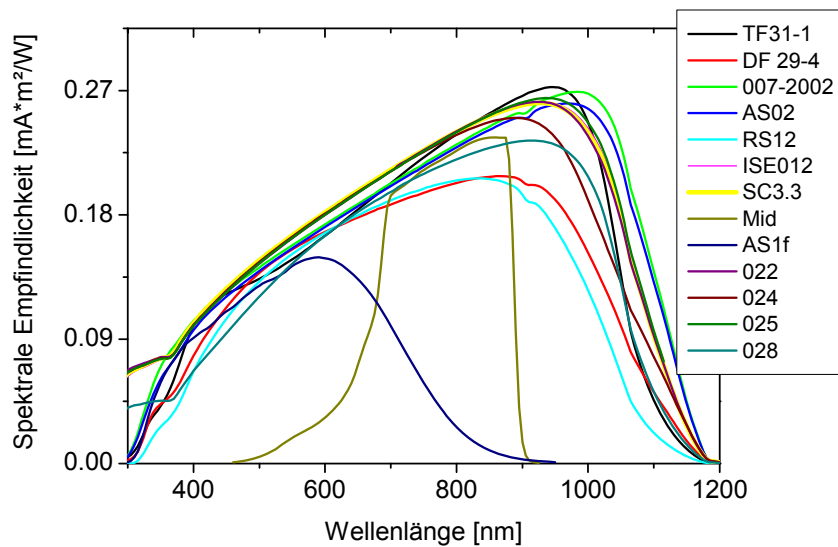


Abbildung 7.2: Spektrale Empfindlichkeiten der Referenzsolarzellen des Fraunhofer ISE Callab PV Cells.

Dieser Pool aus primär kalibrierten Referenzsolarzellen erlaubt es einerseits eine für die Testsolarzelle sehr gut angepasste Referenzzelle zu verwenden, andererseits gibt der direkte Vergleich dieser Solarzellen Aufschluss über die Stabilität der Referenzzellen und die Qualität der Spektralkorrektur.

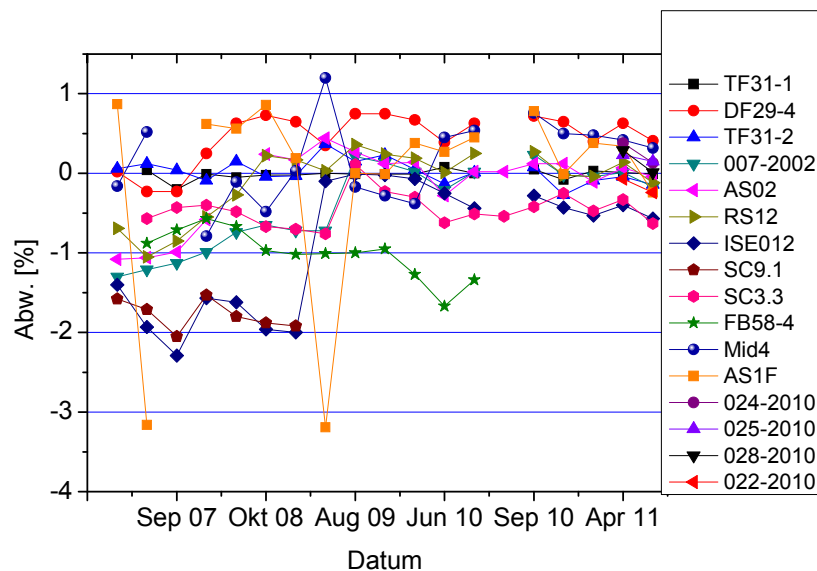


Abbildung 7.3: Auswertung des Vergleiches von Referenzsolarzellen. Aufgetragen sind die Abweichungen der Referenzsolarzellen zum Kalibrierwert beim Vergleich untereinander mit Hilfe des Sonnensimulators unter Verwendung der Spektralkorrektur.

Die Auswertungen der Daten in Abbildung 7.3 sind ein wichtiger Punkt in der Verbesserung und der Analyse für systematische Fehlerquellen. Die großen Abweichungen Anfang 2009 waren auf einen Fehler bei der Kalibrierung des Spektralradiometers zurückzuführen. Seit Oktober 2008 (zweite Messung) wird ein neues Spektralradiometer benutzt, welches seither für jede Messung neu kalibriert wird. Im Zeitraum 2008-2009 wurden fast alle Referenzzellen (außer FB58.4, Mid 4 – und TF 31-1) bei der

PTB neu kalibriert. Die Zelle FB58.4 ist ca. 1% degradiert und wird nicht mehr zu Kalibrierzwecken eingesetzt. Die Zelle SC 9.1 ist inzwischen defekt. Damit liegen alle Abweichungen (außer der Zelle DF29-4) in einem Bereich von $\pm 0.25\%$. Die Zelle DF29-4 liegt trotz Neukalibrierung mit 0.75% deutlich über den anderen Solarzellen. Es ist anzumerken, dass die Messunsicherheiten der primär-kalibrierten Referenzsolarzellen durch die PTB bei ca. $\pm 0.6\%$ liegen. Damit liegen alle aktuellen Abweichungen innerhalb der Überdeckung der Vertrauensintervalle.

7.2 Eignung von Solarzellen als Referenzsolarzellen

Die Kalibrierfähigkeit ist die wesentliche Voraussetzung für den Einsatz einer Solarzelle als Referenzsolarzelle. Die wichtigsten Kriterien sind dabei:

- Langzeitstabilität
- Linearität
- Homogenität

Referenzsolarzellen werden häufig verkapselt um einerseits eine bessere Langzeitstabilität [64] zu gewährleisten und die Zelle selbst vor Umwelteinflüssen und Abnutzung der Kontakte zu schützen. Des Weiteren wird die Handhabung der Referenzsolarzelle vereinfacht. Ein eingebauter PT-100 Temperatursensor ermöglicht das direkte Erfassen der Zelltemperatur und somit eine automatisierte Regelung dieser. Die Verkapselung wird derzeit nach einem Abkommen standardisiert, der **World PhotoVoltaik Scale (WPVS)** [65]. Die optischen Eigenschaften dieser Verkapselung haben ebenfalls Einfluss auf die Kalibrierfähigkeit der Referenzsolarzellen. Im WPVS Gehäuse werden vorwiegend $2 \times 2 \text{ cm}^2$ Solarzellen verbaut. Diese Solarzellen werden im Reinraum des Fraunhofer ISE als Abwandlung einer Hocheffizienz Solarzellen Struktur hergestellt. Dabei stehen die obigen Kriterien für die Auswahl der Zelltechnologie im Vordergrund.

Die Linearität der Solarzelle sollte im Kurzschluss und einem als Kurzschlussbedingung tolerierten Bereich sowohl integral als auch spektral gewährleistet sein. Hiermit sind aktuelle dielektrische Passivierungen – wie für Hocheffizienzsolarzellen üblich- für die Zellrückseite ausgeschlossen. Als Kriterium für die Zellsortierung wurde in dieser Arbeit die Abweichung im Strom bei 0.1 V zwischen den Hellkennlinien bei 1 und 0.1 Sonnen (1000 und 100 W/m^2) von $< 1\%$ eingeführt.

$$Abw = 100 \left(1 - \frac{I(0.1V, 1000W/m^2)}{I(0V, 1000W/m^2)} / \frac{I(0.1V, 100W/m^2)}{I(0V, 100W/m^2)} \right) \quad (7.1)$$

Welche Werte von R_p und I_{02} zur Einhaltung dieser Anforderung an die Abweichungen zulässig sind, wurde in dieser Arbeit mit dem Zweiodenmodell und den Parametern

$$n_1 = 1;$$

$$n_2 = 2;$$

$$I_l = 0.038 \text{ A/cm}^2$$

$$R_s = 0.7 \text{ Ohm cm}^2$$

berechnet.

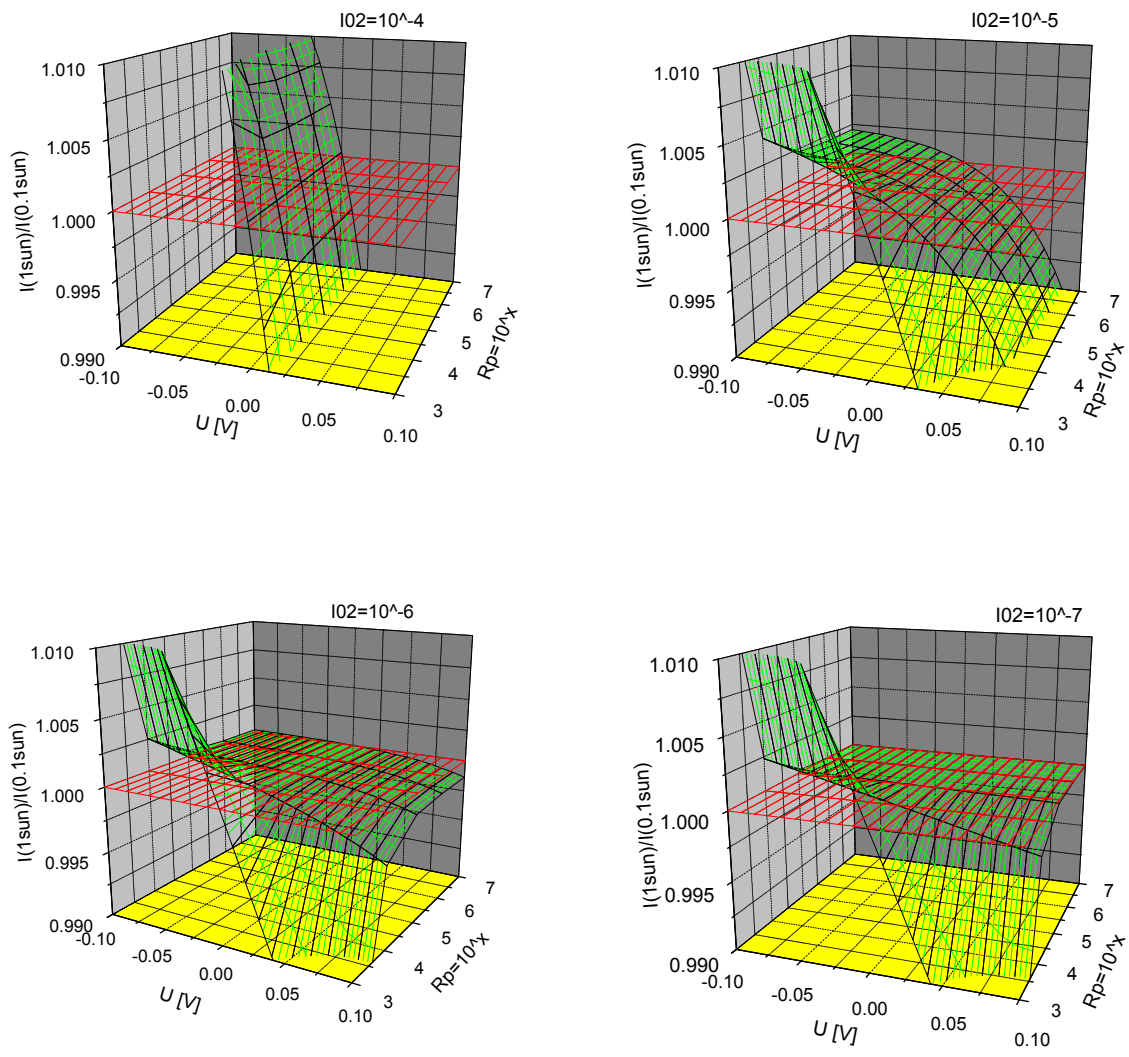


Abbildung 7.4: Quotient der IV-Kennlinien bei 0.1 und 1 Sonne Bestrahlungsintensität berechnet mit dem Zwei-Diodenmodell. Eine Abweichung von 1% von der Linearität wird hierbei als Kriterium für die Verwendung als Referenzsolarzelle akzeptiert.

Hieraus ergibt sich, dass sich Solarzellen mit einem $R_p < 10^4$ Ohm cm^2 und einem $I_{02} > 10^{-5}$ A/ cm^2 nicht als Referenzsolarzellen eignen.

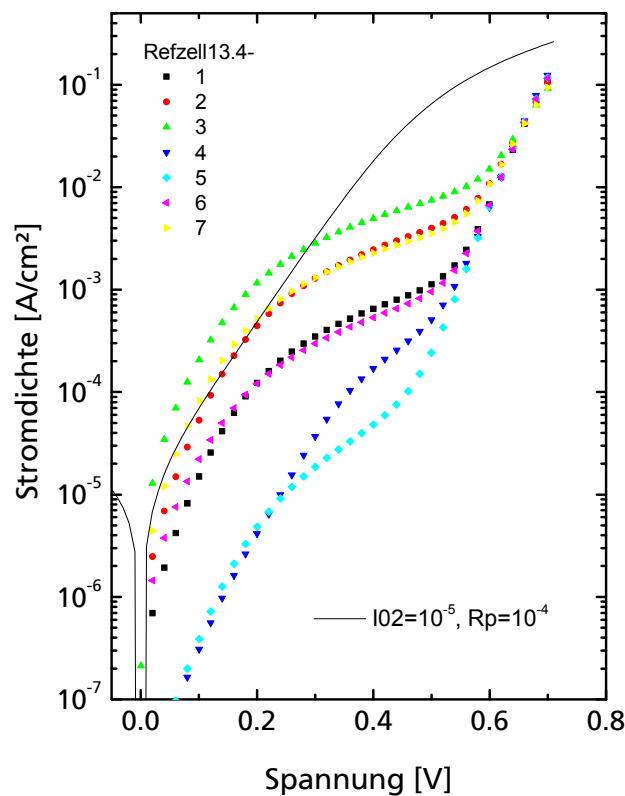


Abbildung 7.5: Dunkelkennlinien gemessen an Solarzellen der Charge Refzell13 mit einer berechneten Kennlinie (2-Diodenmodell) mit dem als grenzwertig (für die Eignung als Referenzsolarzelle) bestimmten Parametern $J_{02} = 10^{-5} \text{ A}$ und $R_p = 10^4 \text{ Ohm}$.

Ein Vergleich der an der Referenzzellencharge 13 gemessenen Dunkelkennlinien mit der Dunkelkennlinie aus dem 2-Diodenmodell mit $J_{02} = 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ und $R_p = 10^4 \text{ Ohm cm}^2$ zeigt klar, welche Solarzellen als Referenzsolarzellen ungeeignet sind (Zelle 4.2, 3 und 7).

7.3 Auswahl verschiedener Technologien von Solarzellen für WPVS Referenzsolarzellen

Um Referenzsolarzellen vor Schäden durch Gebrauch oder Umwelteinflüsse zu schützen werden diese in ein standardisiertes Gehäuse verkapselt [65]. Die dafür verwendeten Solarzellen werden im Reinraum des Fraunhofer ISE hergestellt. Die oben genannten Eigenschaften der Solarzellen stellen die prinzipiellen Anforderungen an Solarzellen für ihre Eignung als Referenz dar. Darüber hinaus sind die spektralen Eigenschaften das wesentliche Kriterium bei der Anpassung der Referenz zur Testsolarzelle. Die Fertigungstechnologien des ETA/ab bieten vielfältige Möglichkeiten und führen zu einer Vielfalt an Solarzellen mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten.

Hierbei sind vor allem unterschiedliche Rückseitenpassivierungen interessant, da diese durch Veränderung der Rückseitenrekombination (S_{back}) und der Diffusionslänge ($L_{e,p}$) im Wesentlichen die spektrale Empfindlichkeit bei langen Wellenlängen beeinflussen. Einlegierte Aluminium-Kontaktmetallisierung führt zu einem Alu-BSF wie bei Standard Industrie Solarzellen. Eine Bor Diffusion (Bor-BSF) ermöglicht eine bessere Passivierung der Rückseite und erhöht dadurch die Empfindlichkeit im Langwelligen weiter. Eine noch bessere Passivierungsqualität wird durch dielektrische Passivierungen erreicht wie sie bei Hocheffizienzsolarzellen eingesetzt werden. Zur Zeit verfügbare Passivierungsschichten führen jedoch überwiegend zu einer hochgradig nichtlinearen spektralen Empfindlichkeit und entsprechen daher nicht den Kriterien für die Anwendung als Referenz. Die

Verwendung von Siliciummaterial mit geringerer Grunddotierung erhöht den Passivierungseffekt des Bor-BSF und erlaubt durch Absenken der Basisdotierung die Empfindlichkeit der Solarzelle im Bereich oberhalb 1000 nm zu erhöhen. Des Weiteren lassen sich die optischen Eigenschaften der Solarzellen modifizieren. Eine Pyramidenstruktur auf der Vorderseite verbessert sowohl die Strahlungseinkopplung als auch die interne Reflexion im langwelligen Spektralbereich. Allein mit diesen Möglichkeiten lassen sich sechs verschiedene Solarzellen mit sehr unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten herstellen.

Entscheidend ist nun, welcher Zelltyp als Referenz für welche Industriesolarzellen geeignet ist:

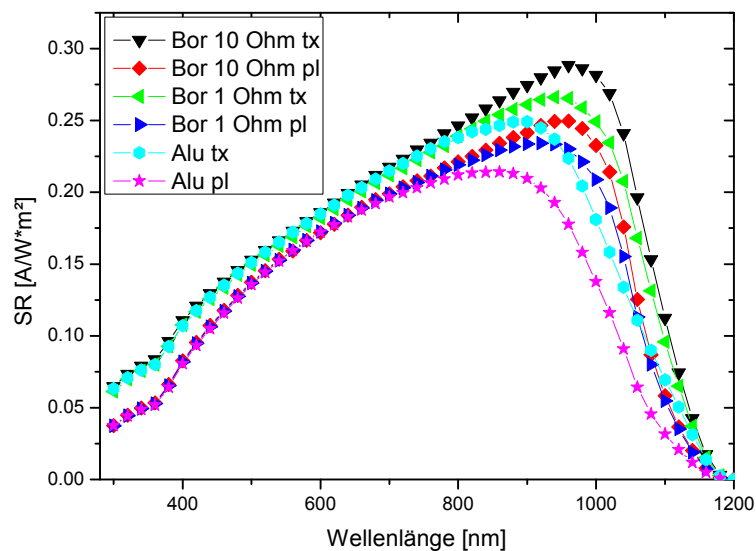


Abbildung 7.6: Übersicht über die spektralen Empfindlichkeiten der Solarzellen (Charge Refzell13) mit Alu- bzw. Bor-BSF kombiniert mit Textur oder ohne Textur. Dabei führt eine Variation der Dotierung (Ohmigkeit) des Basismaterials zu Unterschieden in der Wirkung des BSFs und damit zu unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Solarzellen.

Um die spektrale Anpassung dieser Solarzellen an industriell gefertigte Solarzellen zu untersuchen, wurden nun Anpassungsindizes (s. Abschnitt 3.3) für verschiedene Kombinationen von Solarzellen und Referenzen berechnet. Dabei wurde ein Klasse A Xe-Sonnensimulatorspektrum (XAT) zugrunde gelegt. Als typische spektrale Empfindlichkeiten wurden gemessene Werte einer Hocheffizienz-Rückkontaktsolarzelle ($J_{SC} \approx 40 \text{ mA/cm}^2$), einer mono- und einer multikristallinen Siliciumsolarzelle und einer EFG Siliciumsolarzelle verwendet.

BCC c-Si	MM	API		mc-Si	MM	API
nrp16204_Alu_pl	1.0212	5.2166		nrp16204_Alu_pl	1.0082	2.9156
nrp16205_alu_tx	1.0142	3.5631		nrp16205_alu_tx	1.0013	1.2550
nrp1731_Bor10Ohm_tx	1.0077	1.6916		nrp1731_Bor10Ohm_tx	0.9949	1.4632
nrp1734_Bor10Ohm_pl	1.0167	3.0109		nrp1734_Bor10Ohm_pl	1.0037	0.7214
nrp1782_Bor10Ohm_tx	1.0051	1.1382		nrp1782_Bor10Ohm_tx	0.9922	1.9738
nrp1784_Bor10Ohm_pl	1.0161	2.5453		nrp1784_Bor10Ohm_pl	1.0031	0.9375
c-Si	MM	API		EFG	MM	API
nrp16204_Alu_pl	1.0114	4.0621		nrp16204_Alu_pl	0.9996	1.7977
nrp16205_alu_tx	1.0044	2.4017		nrp16205_alu_tx	0.9927	3.4498
nrp1731_Bor10Ohm_tx	0.9980	0.6741		nrp1731_Bor10Ohm_tx	0.9864	5.0822
nrp1734_Bor10Ohm_pl	1.0069	1.7155		nrp1734_Bor10Ohm_pl	0.9951	3.6822
nrp1782_Bor10Ohm_tx	0.9954	0.8559		nrp1782_Bor10Ohm_tx	0.9838	5.6880
nrp1784_Bor10Ohm_pl	1.0063	1.1642		nrp1784_Bor10Ohm_pl	0.9946	4.3179

Tabelle 7.1: Übersicht über berechnete spektrale Mismatchfaktoren MM und Anpassungsindizes API für verschiedene Referenzsolarzellentechnologien kombiniert mit typischen spektralen Empfindlichkeiten von Industriesolarzellen. Grundlage der Berechnungen war ein Klasse A Xenon Spektrum des XAT Sonnensimulators.

Beste Anpassungen werden bei den mono- bzw. multikristallinen Solarzellen mit den Bor-BSF Referenzsolarzellen mit bzw. ohne Textur, erreicht.

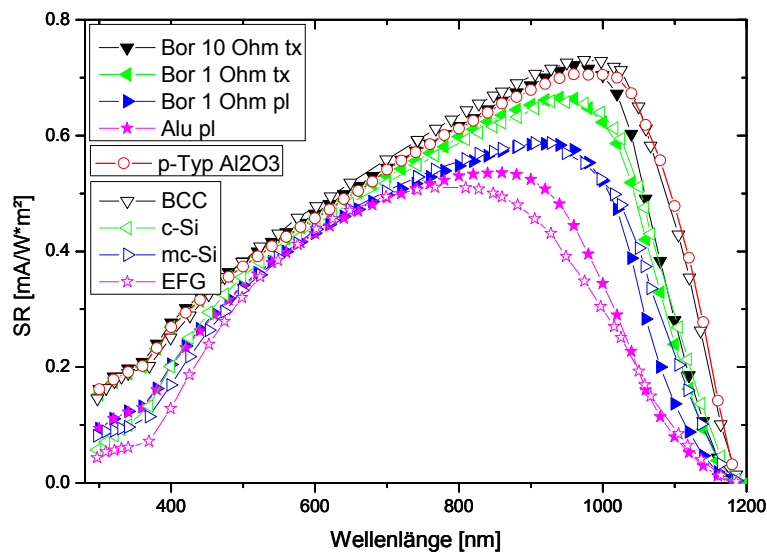


Abbildung 7.7: Vergleich der spektralen Empfindlichkeiten von Industriesolarzellen mit den ausgewählten Referenzsolarzellen. Die Auswahl wurde anhand des spektralen Anpassungsfaktors getroffen. Die Unterschiede liegen im Wesentlichen im infraroten Spektralbereich.

Für Hocheffizienz solarzellen sind Al₂O₃ passivierte Solarzellen [66] sehr gut geeignet, da man mit der sehr guten Passivierung und den hohen Diffusionslängen im Material vergleichbar gute Empfindlichkeiten im langwelligem Spektralbereich erreicht.

7.4 WPVS Referenzsolarzellen für „neue“ Solarzellentechnologien

Für Solarzellentechnologien aus meist nicht kristallinem Material müssen die spektralen Eigenschaften der angepassten Referenzsolarzellen weiter eingeschränkt werden als es mit Hilfe der zur Verfügung stehenden kristallinen Technologie möglich ist. Daher kommen auch gefilterte Referenzsolarzellen zum Einsatz.

Aktuell interessante derartige Solarzellentechnologien sind vor allem a-Si, a-Si/a-Si, a-Si/ μ -Si, CIGS, CIS und CdTe. Derzeit verwendete Absorptions-Filter sind in Abbildung 7.8 dargestellt. Für Mehrfachsolarzellen werden Referenzsolarzellen für die einzelnen Teilmzellen benötigt.

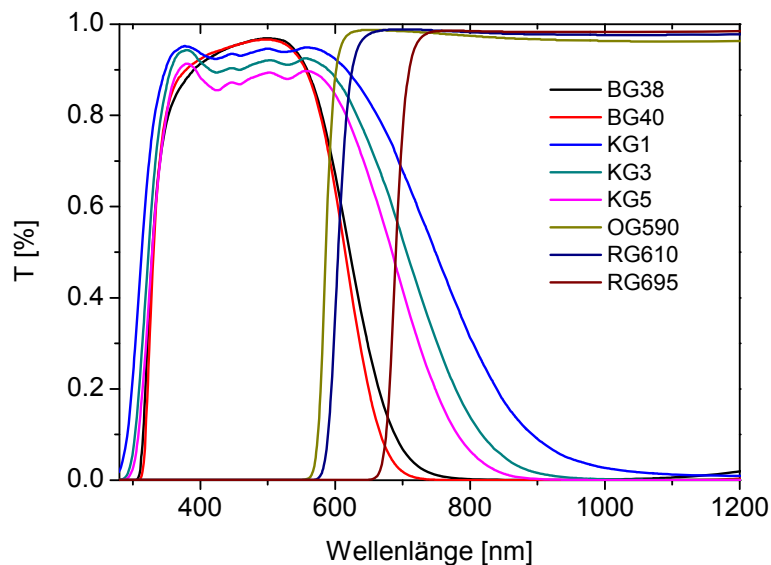


Abbildung 7.8: Mit Hilfe von Filtern werden die Spektralbereiche der Referenzsolarzellen weiter modifiziert um auch für nicht kristalline Solarzellentechnologien wie a-Si, a-Si/a-Si und in Zukunft a-Si/ μ -Si spektral angepassten Referenzen zu erhalten, welche die Qualitätsmerkmale Stabilität und Linearität der kristallinen Siliciumsolarzellen haben. Aus [67].

Die Kombination dieser Filter mit den verschiedenen Referenzsolarzellentypen aus Abbildung 7.6 könnten mit Hilfe des Anpassungsfaktors für die Anpassung an „neue“ Solarzellentechnologien optimiert werden, jedoch zeigt eine solche Analyse, dass die Fehl-Anpassungen noch deutlich größer sind als die Unterschiede durch die verschiedenen Referenzsolarzellentypen. Daher sind hier noch weitere Arbeiten über den Einsatz von Filtern notwendig. Es ist jedoch offensichtlich, dass aufgrund der geringen Empfindlichkeit der amorphen und mikrokristallinen Solarzellentechnologien im infraroten Spektralbereich für diesen Zweck prinzipiell alle Referenzsolarzellentypen mit zusätzlicher Filterung verwendet werden können.

Für Unterzellen von a-Si/X Mehrfachzellen kommen auch Siliziumsolarzellen mit einigen 100 nm a-Si Passivierungsschichten in Frage. Diese a-Si Schichten würden - ohne Emitter ausgeführt - die Absorption der Oberzellen nachbilden. Berechnungen von Anpassungsfaktoren mit 9 verschiedenen Solarzellen und unterschiedlich gefilterten Referenzsolarzellen wurden durchgeführt. Dabei wurde eine Solarzelle aus GaAs als Referenzsolarzelle hinzugefügt, da diese sich ebenfalls als Referenz eignet.

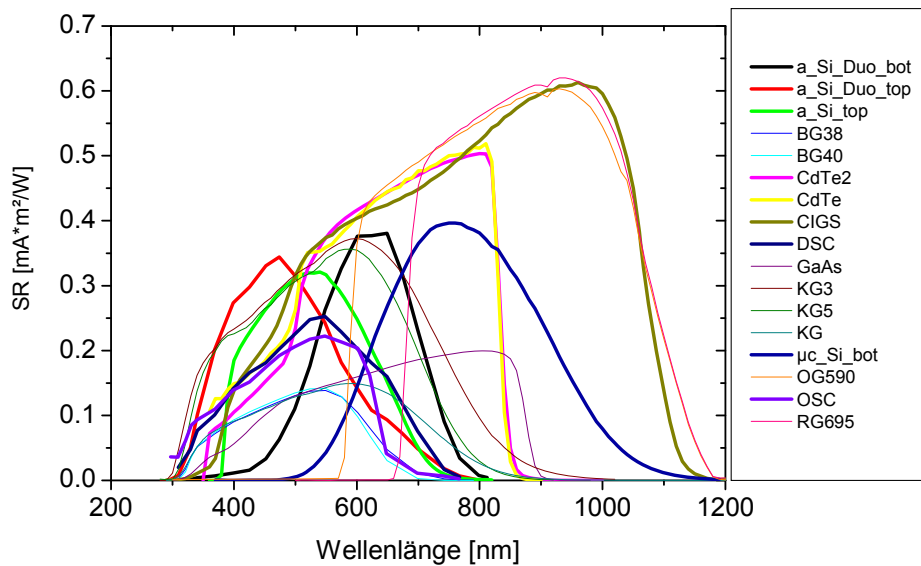


Abbildung 7.9: Spektrale Empfindlichkeiten von „neuen“ Solarzellentechnologien und gefilterten Referenzsolarzellen. Die GaAs Solarzelle eignet sich ebenfalls als Referenzsolarzelle.

Die Auswertung der Anpassungsfaktoren ist in der Kreuz-Tabelle 7.2 zusammengefasst.

API	a_Si_Duo_bot	a_Si_Duo_top	a_Si_top	BG38	BG40	CdTe2	CdTe	CIGS	DSC	GaAs	KG3	KG5	KG	µc_Si_bot	OG590	OSC	RG695
a_Si_Duo_bot	0.0	32.6	25.9	27.2	29.6	18.8	19.7	31.0	22.2	23.0	18.6	18.2	18.0	33.9	36.7	26.7	44.1
a_Si_Duo_top		0.0	9.9	7.8	7.9	28.4	27.2	31.1	11.2	26.4	17.8	15.1	16.7	42.2	40.6	9.6	45.6
a_Si_top			0.0	4.7	5.0	27.2	26.6	34.4	6.1	27.0	16.3	12.2	14.3	43.8	42.8	5.7	49.7
BG38				0.0	2.6	27.2	26.4	32.8	5.6	26.4	15.8	11.7	13.9	43.2	41.7	2.4	47.5
BG40					0.0	29.7	28.8	34.6	8.2	28.7	18.3	14.3	16.5	45.3	43.7	3.3	48.4
CdTe2						0.0	1.7	19.7	22.0	6.4	12.1	16.3	14.1	17.7	24.6	28.1	30.6
CdTe							0.0	19.8	21.3	5.5	11.5	15.7	13.5	18.2	24.8	27.3	30.8
CIGS								0.0	30.4	16.4	22.7	26.5	24.7	15.3	9.7	33.8	15.5
DSC									0.0	22.0	10.4	6.3	8.4	39.0	38.4	6.1	45.9
GaAs										0.0	12.2	16.8	14.5	17.0	21.0	27.5	26.5
KG3											0.0	4.8	2.4	28.9	29.5	16.5	37.3
KG5												0.0	2.5	33.7	33.8	12.1	41.7
KG													0.0	31.2	31.8	14.5	39.5
µc_Si_bot														0.0	9.5	44.3	14.6
OG590															0.0	42.9	7.8
OSC																0.0	47.4
RG695																	0.0

Tabelle 7.2: Anpassungsfaktoren für verschiedene „neue“ Solarzellentechnologien kombiniert mit unterschiedlichen (gefilterten) Referenzsolarzellen.

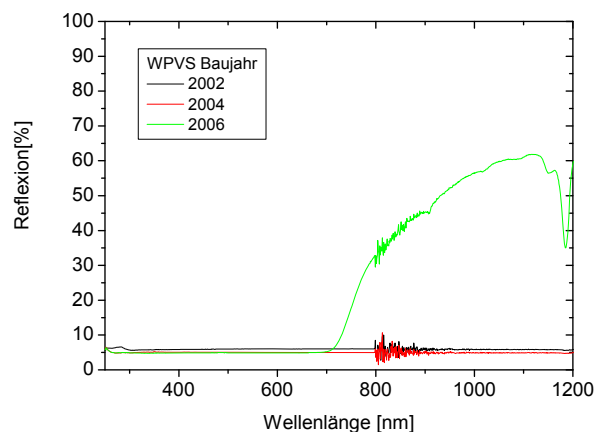
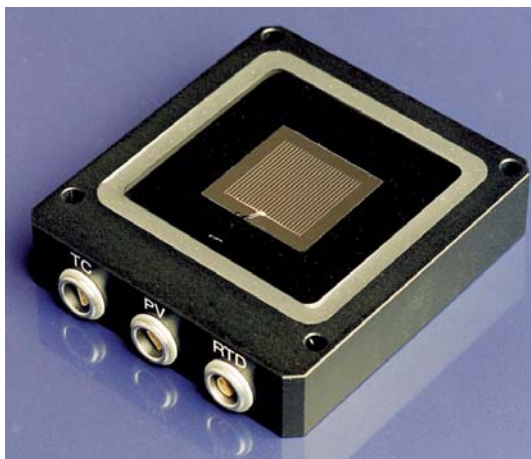
Aus diesen Berechnungen zeigt sich, dass Filterungen mit BG38 und OG590 als auch GaAs Referenzsolarzellen für die Anwendung sehr interessant sind. Weitere Berechnungen ergeben eine optimierte Anpassung für µc-Si unter Verwendung einer planen Referenzsolarzelle mit Aluminium Rückseite (Alu pl). Bei Filterung mit einem BG38 ist die Anpassung hingegen nicht sensitiv gegenüber dem Typ der Referenzsolarzelle.

Bei der Verwendung von Referenzen für Mehrfachsolarzellen spielt die angewandte Messprozedur eine wesentliche Rolle. Die Weiterentwicklung, Untersuchung und Verwendung von Referenzen für „neue“ Solarzellentechnologien ist ein Kernthema der weiterführenden Dissertation von Holger Seifert im ISE Callab PV Cells.

7.5 Randeinflüsse bei WPVS Referenzsolarzellen

7.5.1 Einflüsse der Verkapselung bei WPVS Referenzsolarzellen

Die Reflexion der Umgebung innerhalb des WPVS-Gehäuses durch Interreflexion am Deckglas führt zu einem Strombeitrag der Referenzsolarzelle [68]. Dieser Beitrag ist spektral von den Reflexionseigenschaften des Materials, welches die Solarzelle umgibt, abhängig.



a)

b)

Abbildung 7.10: a) Bild einer WPVS Referenzsolarzelle. b) Reflexion der Umgebung der Referenzsolarzelle gemessen durch das Deckglas für verschiedene Typen/Baujahre der WPVS-Zellen. Die ansteigende Reflexion bei 700 nm beim Baujahr 2006 ist auf eine Aluminium-Eloxalschicht zurückzuführen.

Die Interreflexionen zwischen dem schwarz eloxierten Rand des WPVS Gehäuses und dem Deckglas führen zu einem spektral selektiven Strombeitrag. Langwellige Strahlung, welche neben der Solarzelle auf die Aluminiumschicht trifft, wird teilweise diffus reflektiert. Aufgrund der Totalreflexion an der Glasverkapselung gelangt ein Teil dieser Strahlung zur Solarzelle und trägt zum Strom bei. Damit ist die spektrale Empfindlichkeit der gesamten WPVS Solarzelle stark ortsabhängig. Eine Messung mit Überstrahlung der Solarzelle wie sie an einem Sonnensimulator oder einem Messplatz für großflächige Messungen der spektralen Empfindlichkeit [69] durchgeführt werden, unterscheidet sich somit von einer unterstrahlten Messung (Messfleck kleiner als Solarzelle), wie sie beispielsweise an einem Gittermonochromatormessplatz durchgeführt wird. Die in Abbildung 7.11 gezeigte Abweichung der spektralen Empfindlichkeit zeigt deutlich die erhöhte Empfindlichkeit oberhalb 700 nm bei der überstrahlten Messung gegenüber der unterstrahlten Messung. Wird die Solarzelle überstrahlt am Sonnensimulator gemessen, jedoch mit einer unterstrahlt gemessenen spektralen Empfindlichkeit korrigiert, so wirkt sich dies beim spektralen Mismatch am XAT Sonnensimulator nur mit 0.17 % aus. Nur im Vergleich zu einer unterstrahlt gemessenen Kennlinie (z.B. bei Verwendung einer kleinen Maske) kommt bei der überstrahlten Messung noch der zusätzliche Strombeitrag vom Rand hinzu.

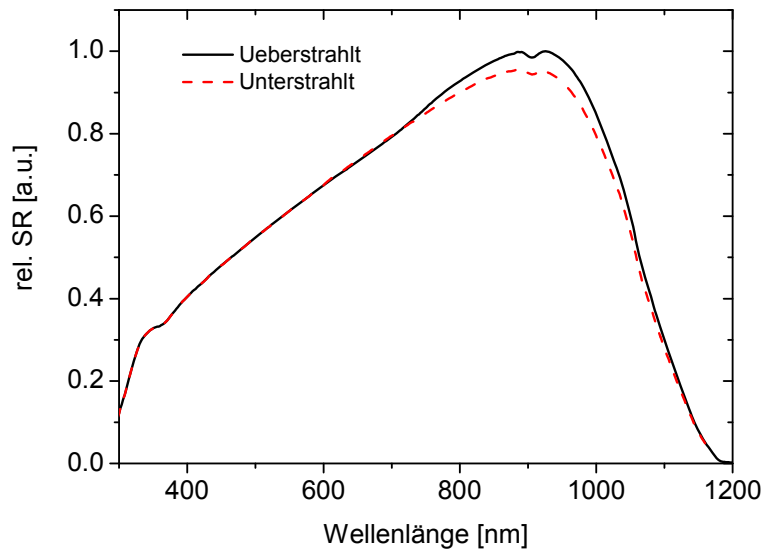


Abbildung 7.11: Messung der spektralen Empfindlichkeit einer WPVS-Referenzsolarzelle (Baujahr 2006) mit einem überstrahlten und einem unterstrahlten Messverfahren.

Solche WPVS Referenzsolarzellen müssen an ihre Verwendung angepasst kalibriert werden. Die häufigste Anwendung ist eine überstrahlte Vermessung, jedoch werden solche Solarzellen auch unterstrahlt als Referenz für Gittermonochromator Messplätze genutzt. Daher ist bei der Kalibrierung dieser Referenzen auf die Art der späteren Verwendung zu achten. Da diese Problematik mit den vorliegenden Analysen bekannt ist, werden solche kritischen Referenzsolarzellen am ISE nicht mehr hergestellt.

7.5.2 Einflüsse vom Rand der Referenzsolarzellen

Die *ETA/lab* Referenzsolarzellen werden auf p-Typ dotiertem Material mittels n-Emitter in Form einer Emitterwanne ausgeführt. Die Frontseite wird mit SiO_2 passiviert, dabei ist die entstehende Grenzschicht bekannt für bestrahlungsabhängige Rekombination (s. Abschnitt 2.4, vgl. [24]).

Die Auswirkungen dieser nichtlinearen Umrandung der Referenzsolarzellen auf die Kalibriermethode wurden bereits in [50] eingehend untersucht. Dabei konnte die Existenz dieses Effektes experimentell und die Größenordnung ihrer Auswirkung mittels Simulation ermittelt werden.

In der bis 2004 durchgeführten Kalibrierprozedur der PTB wurde die bestrahlungsabhängige Rekombination des Randes nicht berücksichtigt. Zwischenzeitlich konnte die PTB an ihrem Aufbau die Auswirkung dieses Effektes an einer WPVS Solarzelle exemplarisch untersuchen [70] und die überstrahlte Bestimmung der Nichtlinearität als Standard-Messverfahren einführen. Dabei ergibt sich bei Messungen der PTB ein Unterschied durch den Randbeitrag von 2-3%, ca. der doppelte Effekt bei der Messung, wie zuvor durch die Simulation berechnet.

7.6 Degradation der Verkapselung von WPVS-Solarzellen

Untersuchungen zur Stabilität der Solarzellen und der Verkapselung wurden bereits teilweise durchgeführt (s. [64]). Die Entwicklung und der Bau dieser Verkapselung werden unabhängig vom CalLab PV Cells und dieser Arbeit im Bereich der Materialprüfung durchgeführt. Da sich aufgrund der Optimierungen der Verkapselung die Materialien und der Zusammenbau ändern, ist eine stetige Begleitung dieser Weiterentwicklung notwendig. WPVS Solarzellen können mit und ohne Deckglas gefertigt werden. Die Standardversion ist mit HOQ-Quarzglas versehen. Dieses wird in einer Zweikomponenten-Vergussmasse eingebettet. Da als Abbauprodukt dieser Vergussmasse Essigsäure entsteht, welche mit der Metallisierung der Solarzelle reagieren kann, wurde 2008 eine Epoxy Schicht direkt auf den Solarzellen zu deren Schutz aufgebracht. Diese Schicht unterliegt jedoch starker lichtinduzierter Degradation, was sich in einer Trübung dieser widerspiegelt. Die Untersuchung dieses Effektes ist in Abbildung 7.12 gezeigt.

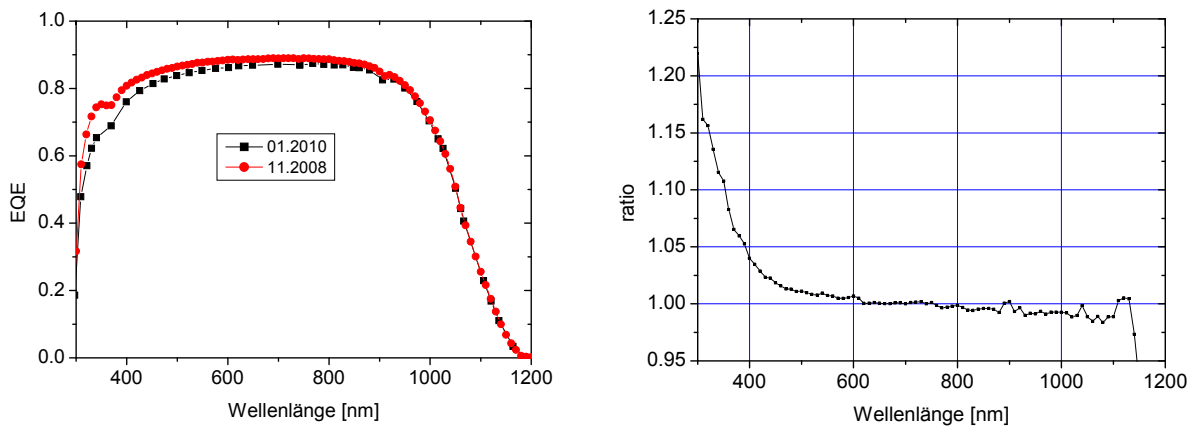


Abbildung 7.12: Externe Quanteneffizienten gemessen an einer WPVS Solarzelle Baujahr 2008 vor und nach 13 Monaten Gebrauch.

Die aus gemessenen EQE-Kurven berechnete IQE (interne Quanteneffizienz) zeigt deutlich reduzierte Werte unterhalb 600 nm. Wäre eine Degradation der Referenzsolarzelle hierfür verantwortlich, so müsste auch der U_{OC} der Solarzelle deutlich geringer ausfallen. Eine Messung konnte jedoch mit (652 ± 1) mV den Wert von 2008 reproduzieren, womit die Degradation der Zelle selbst ausgeschlossen werden kann.

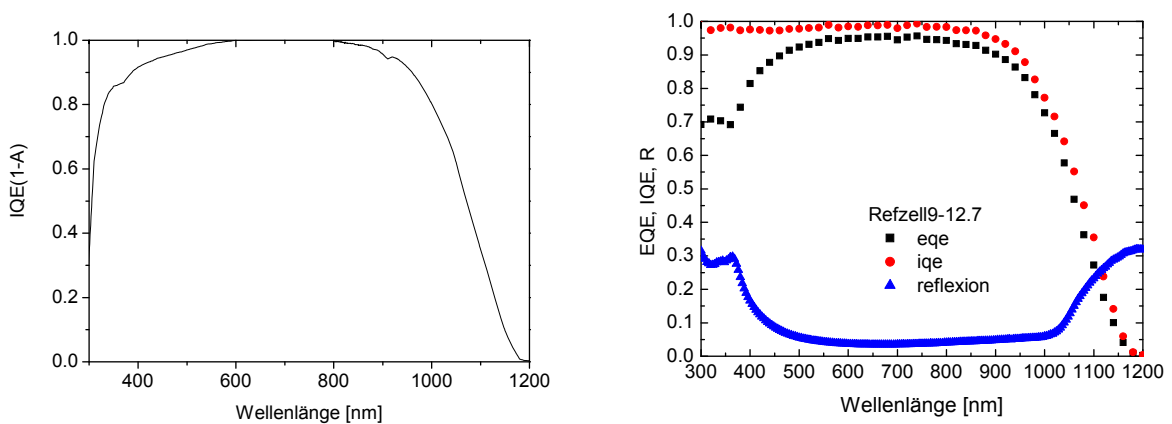


Abbildung 7.13: Die berechnete IQE zeigt einen deutlichen Einbruch unterhalb 600 nm durch zunehmende Absorption (im Vergleich zu einer IQE an einer unverkapselten Solarzelle rechts).

7.7 Verwendung von Industriesolarzellen als Referenzsolarzellen

In der Industrie werden unverkapselte Solarzellen als Referenzsolarzellen eingesetzt. Diese Solarzellen werden üblicherweise direkt aus derselben Produktion entnommen, für die sie nach der Kalibrierung als Referenz dienen. Auf diesem Weg wird eine möglichst hohe Ähnlichkeit der für den Einsatz als Referenz relevanten Zelleigenschaften erzielt. Dabei sind die spektrale Reflexion, die Geometrie der Metallisierung und die spektrale Empfindlichkeit die wesentlichen Eigenschaften, deren Ähnlichkeit für die Verwendung als Referenz notwendig ist. Die spektrale Reflexion kann in Verbindung mit Interreflexion im Sonnensimulator ein wichtiger Einflussfaktor sein. Vor allem im industriellen Messaufbau einer Solarzellenproduktion können auch Teile des Maschinenbaus durch Reflexion die Messung beeinflussen. Dieselbe Geometrie der Metallisierung von Referenz- und Testsolarzelle ermöglicht es die Kontaktierungseinheit des Meßsystems unverändert sowohl für die Kalibrierung des Systems als auch für die Vermessung zu verwenden. Die verwendeten Messleisten verursachen sowohl Schatten als auch Reflexionen. Diese beeinflussen die Messung unterschiedlich bei Verstellung der Messleisten und abhängig von der Divergenz der Strahlung. Beim Schattenwurf der Leisten fällt der größte Anteil auf den Busbar der Zelle. Abhängig von der Justiergenauigkeit der Zelle kompensiert sich dieser Effekt bei Verwendung von ähnlichen Zellen bzgl. der Metallisierungsgeometrie.

Des Weiteren führt in der industriellen Messung in der Produktionslinie die Abweichung der spektralen Empfindlichkeit der Referenzsolarzelle zur Testsolarzelle zu einem Fehler in der Strommessung, dem spektralen Mismatch. Dies ist unvermeidbar, da die Zelleigenschaften Exemplarstreuungen in der spektralen Empfindlichkeit aufweisen. Beim Einsatz der Referenzsolarzelle in der Produktion zur Messung der hergestellten Solarzellen kann dieser Mismatch durch Auswahl der Referenzsolarzelle aus einem mittleren Strom-Bins in der Zellsortierung minimiert werden [71].

Für die Verwendung von Industriesolarzellen als Referenz für die Produktion sollten folgenden Kriterien berücksichtigt werden:

- Beim Einsatz der Referenzzellen in der Produktion sollten die Zellen aus einem mittleren Strom-Bin gewählt werden, um den spektralen Mismatch gering zu halten.
- Die Solarzellen sollten vordegradiert und die Stabilität kontrolliert sein.
- Die Rückseite sollte eben sein (ohne Cu-Bändchen), um einen guten thermischen Kontakt zum Messblock zu ermöglichen.
- Die spektrale Empfindlichkeit sollte möglichst linear sein.
- Die Inhomogenität (optisch und elektrisch) sollte möglichst gering sein.
- Der Parallelwiderstand sollte $> 2k \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ sein (vgl. Abschnitt 6.3.1).

Inhomogenitäten bei Solarzellen können sowohl material- als auch prozessbedingt auftreten. Materialbedingte Inhomogenitäten könnten eher statistisch verteilte Bereiche unterschiedlicher Qualität z.B. die einzelnen Kristalle einer multi-kristallinen Siliciumsolarzelle sein, oder auch flächige Teilbereiche unterschiedlicher Qualität, wenn der Wafer aus einem Randbereich des Blockes gesägt wurde. Prozessbedingte Inhomogenitäten sind z.B. inhomogene Abscheidungen der Antireflex-Nitridschicht, oder auch inhomogene Feuerung der Metallisierung. In Abbildung 7.14 sind die Ergebnisse von PL-Messungen einer Industriesolarzelle gezeigt, welche eine stark inhomogene Kontaktbildung der Metallisierung zum Wafer aufweist.

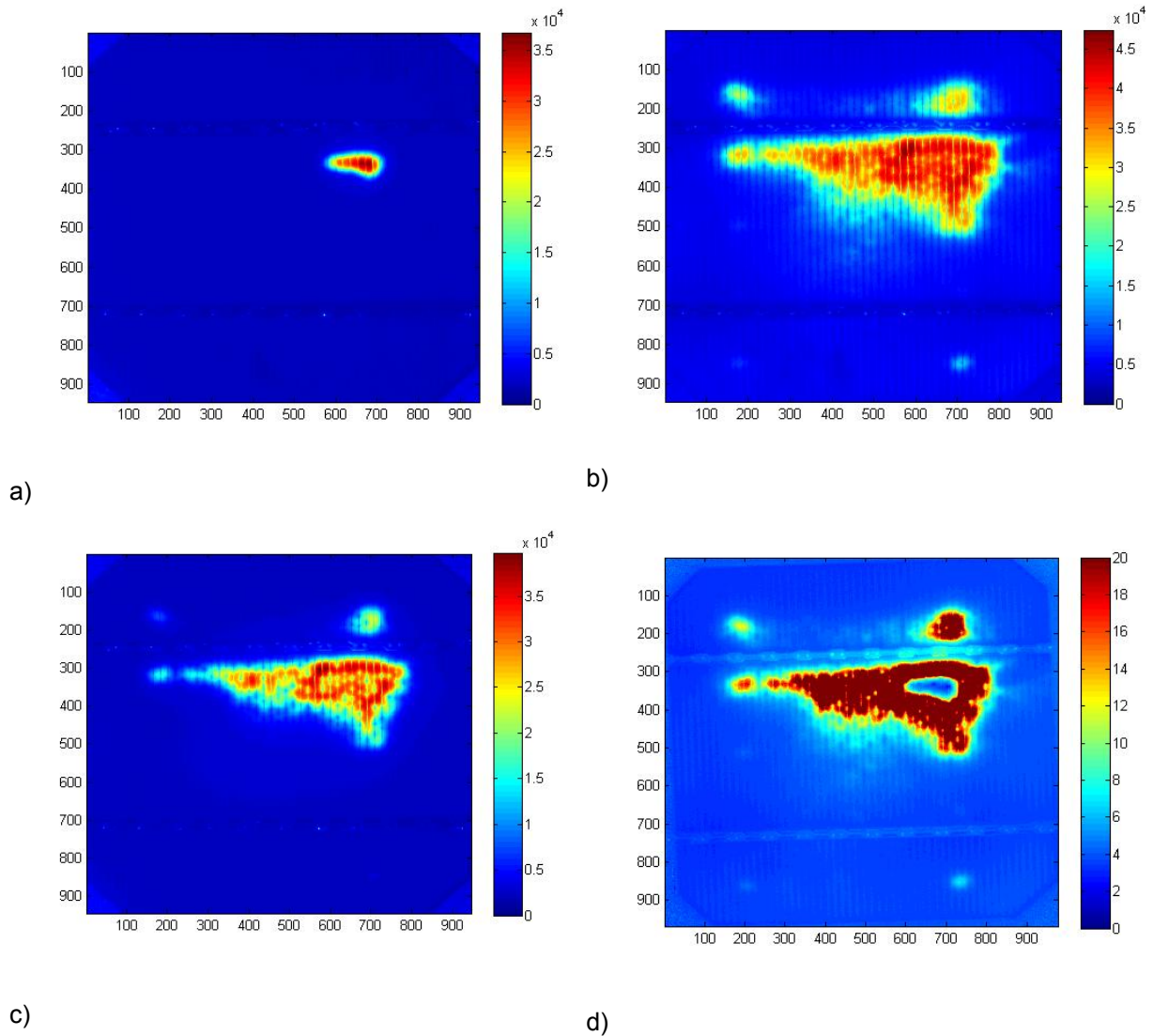


Abbildung 7.14: Solarzelle mit inhomogen gefeuerter Metallisierung. Die Verbindung der Grid-Metallisierung der Solarzelle zeigt teilweise sehr hohe Serienwiderstände und hat diodenähnlichen Charakter a) PL-Signal/[a.u.] im I_{SC} (global), b) bei 80% des I_{SC} , c) im I_{MPP} der Solarzelle, d) berechnetes R_S -Bild.

Dies führt zu einem Serienwiderstand der lateral stark variiert und lokal im k Ω m- oder auch M Ω m-Bereich liegen kann. Im I_{SC} -Bild ist zu erkennen, dass ein ca. 10x5 mm² großer Bereich noch ein starkes PL-Signal aufweist. Aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der einzelnen Bereiche ist anzunehmen, dass das Verhalten teilweise nicht-linear, d.h. eher diodenartig ist. Da die Spannungsverteilung der Zelle sich mit der Geometrie der Kontaktierung stark ändern kann (vgl. Abschnitt 6.3.1), wird eine solche Inhomogenität die Messung der Solarzelle stark beeinflussen.

		Jsc,korr [mA/cm ²]		Jsc,SR [mA/cm ²]	rel Abw [%]
		34.18		35.11	2.69
I01	n1	I02	n2	Rs	Rp
8.52E-13	1	2.46E-08	2.0	1.06	146496.00

Tabelle 7.3: Kurzschlussstromdichten gemessen am Sonnensimulator $J_{sc,korr}$ und berechnet aus der spektralen Empfindlichkeit $J_{sc,SR}$, sowie globale 2-Diodenmodell-Parameter der untersuchten inhomogenen Solarzelle.

7 Referenzzellenentwicklung

Diese Solarzelle war durch große Abweichungen des aus der spektralen Empfindlichkeit berechneten Kurzschlussstromes im Vergleich zur Messung des Kurzschlussstromes am Sonnensimulator aufgefallen und die weitere Analyse ergab einen erhöhten globalen Serienwiderstand (vgl. Tabelle 7.1).

Der Einsatz von verkapselten Industriesolarzellen als Referenz ist meist von geringerem Interesse, da sich in der Produktion Kalibrierung und Messung zu sehr unterscheiden würden und somit eine weitere Quelle für Messunsicherheiten und Fehler entstünde. Für den Einsatz als Vergleichsmessobjekt zwischen Kalibrierlaboren sind solche stabil aufgebauten Industriesolarzellen jedoch besonders interessant, da sie eine gute Möglichkeit eines langfristig einsetzfähigen Messobjektes darstellen und von allen gemessen werden können. Der interne PT-100 Temperatursensor ermöglicht auch automatisierte Kalibrierungen bei der PTB. Daher wurde hier an einem solchen Konzept gearbeitet. Ein wesentliches Problem ist das spannungsfreie ganzflächige Aufkleben der Solarzellen für die thermische und elektrische Kontaktierung. Ein Prototyp ohne Verglasung konnte bisher aufgebaut und getestet werden.

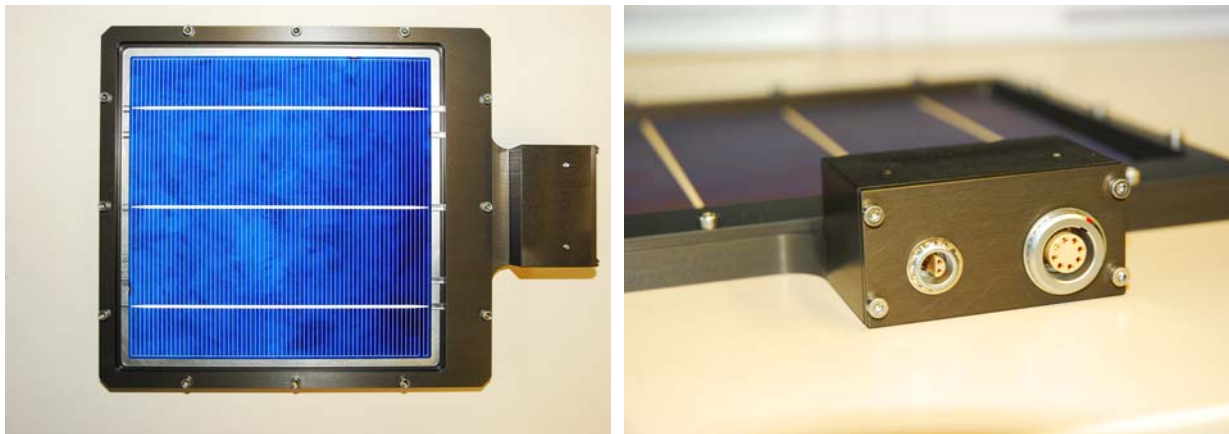


Abbildung 7.15: Prototyp eines Referenzzellengehäuses für 6“ Industriesolarzellen analog zum WPVS Design.

Verschiedene Werkstoffe sind als Substratwerkstoff vorstellbar. Da die Solarzellen elektrisch sehr gut über Cu-Bändchen kontaktiert werden können, stehen die thermischen Eigenschaften der Materialien im Vordergrund. Die Materialien Invar und Kovar sind sehr weich. Daher sind dünne Platten in der erforderlichen Größe sehr uneben und schwierig im Halter zu befestigen. Für Prototypen wurde Titan und Wolfram ausgewählt. Titan ist wesentlich besser zu bearbeiten als Wolfram, hat jedoch die schlechtere Wärmeleitung und Anpassung bei der Längenausdehnung. Da der Leitkleber heiß (150°C) aushärtet, ist die angepasste Längenausdehnung zur Vermeidung von Spannungen wichtig. Die auf Titansubstrat aufgeklebten Zellen haben sich beim Abkühlen vom Substrat gelöst, oder die Substratschichten wurden faltig. Somit erwies sich das besser in der Längenausdehnung angepasste Wolfram als bestes Substrat. Wolfram ist aufgrund seiner Härte schwer zu bearbeiten, jedoch dadurch sehr eben und lässt sich gut im Gehäuse anpressen.

	Längenausdehnungskoeffizient 10^{-6} [K] bei 20 °C	spez. Widerstand [$\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$]	Wärmeleitfähigkeit [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
Gold	14.2	0.02212	316
Invar	1,7-2,0	0.75-0.85	13
Kovar	5	0.49	17
Kupfer	16.5	0.0172	401
Aluminium	23.8	0.0267	237
Messing	19	0.0645	80
Wolfram	2	0.055	130
Titan	8.2	0.08	15
Silicium	2		148
Germanium	5.75		59.9
Silberleikleber PC 3000 Heraeus		0.02	5

Tabelle 7.4: Werkstoffdaten potentieller Werkstoffe als Substratplatte für das Aufkleben von großen Solarzellen. Da die elektrischen Kontakte mit Bändchen an der Solarzelle ausgeführt werden können, sind ein angepasster Längenausdehnungskoeffizient und die thermische Leitung kritische Größen.

Die Messung der Temperaturverteilung (s. Abbildung 7.16) des Prototyps einer großen Referenzsolarzelle zeigt Temperaturinhomogenitäten, die sowohl auf die inhomogene Klebung der Solarzelle auf dem Substrat als auch auf Unebenheit (Verformung) des Substrates zurückzuführen sind.

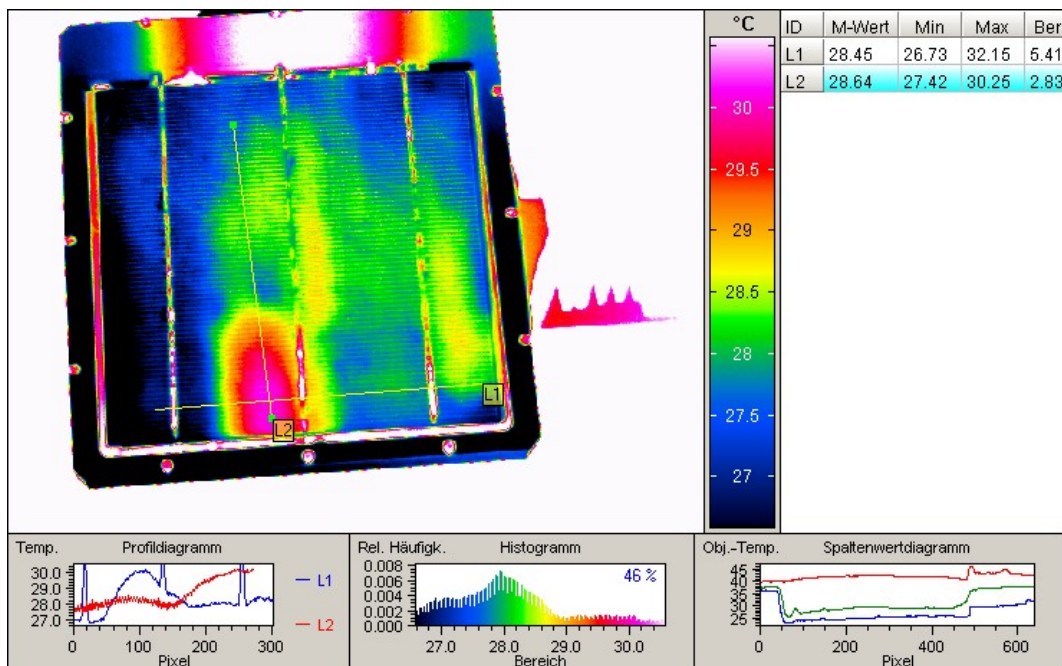


Abbildung 7.16: IR-Bild der großen verkapselten Referenzzelle (6“) unter einem Sonnensimulator mit 1000 W/m^2 auf einem Messblock bei einer mittleren Temperatur von ca. 25°C (aus der IR-Strahlung durch die Kamera ermittelte Temperatur ist absolut nicht korrekt aufgrund Emissivität $\neq 1$).

7.8 Verbesserungspotential

Für Referenzsolarzellen ist eine Vielzahl von Solarzellen mit unterschiedlichsten spektralen Eigenschaften herstellbar. Daher ist es hiermit möglich, einen großen Bereich der Bedürfnisse

abzudecken. Die Auswahl nach elektronischen Eigenschaften wurde in dieser Arbeit weitgehend untersucht und Kriterien festgelegt. Eine Fortsetzung dieser Arbeiten sollte sich vorwiegend auf die weitere Optimierung der Langzeitstabilität und die spektralen Eigenschaften für neue Solarzellenkonzepte (Dünnschicht-Solarzellen) beziehen. Dabei sollte die Auswahl spezieller Filterungen und deren Eigenschaften wie Temperaturabhängigkeit und Stabilität untersucht werden. Des Weiteren wären Winkelabhängigkeiten und der genaue Einfluss der Divergenz der Strahlung in Verbindung mit der Brechungsindexänderung durch die Verkapselung von Interesse.

7.9 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die für jede Solarzellenkalibrierung wichtigen Referenznormale untersucht. Dabei wurden zuerst die elektrischen Parameter für die Auswahl der Solarzellen als Referenzzellen bestimmt. Anschließend wurden die mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellbaren Referenzsolarzellen mit verschiedenen industriell gefertigten Solarzellentypen verglichen, um die spektrale Anpassung der jeweiligen Kombinationen zu bewerten. Diese Untersuchung wurde ebenfalls auf verschieden gefilterte Referenzsolarzellen in Kombination mit unterschiedlichen Dünnschichtsolarzellen angewandt.

Die Einflüsse der Verkapselung dieser Solarzellen auf deren Eignung als Referenzen sind zentraler Teil des Kapitels.

Im letzten Abschnitt wurde die Entwicklung eines Prototyps einer großflächigen Referenzsolarzelle beschrieben.

8 Kalibrierung spezieller Solarzellen

Neue Solarzellenkonzepte auf Basis kristalliner Wafer ermöglichen höhere Wirkungsgrade oder weisen ein Kostensenkungspotential auf. Solche Entwicklungen stellen neue Anforderungen an die Messmöglichkeiten. Die Schaffung dieser Messmöglichkeiten und die Untersuchung neuer Messunsicherheitsbeiträge sind für Kalibrierungen notwendig. Am Beispiel rückkontaktierter Solarzellen und der daraus oft resultierenden Bifacialität werden die relevanten Effekte quantifiziert und Lösungen aufgezeigt. In dieser Dissertation wurde im Wesentlichen die Kalibrierung von Silicium-basierten Solarzellen untersucht. Eine Fortführung dieser Arbeiten für Dünnschichtsolarezellen wird in der Dissertation von Holger Seifert realisiert.

8.1 Rückseitenkontaktierte Solarzellen

Standardsolarzellen werden für gewöhnlich von beiden Seiten elektrisch kontaktiert. Daher gleichen sich die mechanischen Kräfte durch das Anpressen der Kontaktierung aus oder die Solarzelle wird sogar auf eine thermisch stabilisierte Unterlage (Messblock) gedrückt, im Regelfall zusätzlich zur Anpresskraft der Ansaugung der Zelle durch einen Unterdruck, die über Kanäle an der Messblockoberfläche ausgeübt wird. Bei Rückkontaktsolarzellen (s. Abschnitt 2.5) müssen die Realisierung der beiden elektrischen Kontakte und die thermische Kontaktierung von der Rückseite erfolgen.

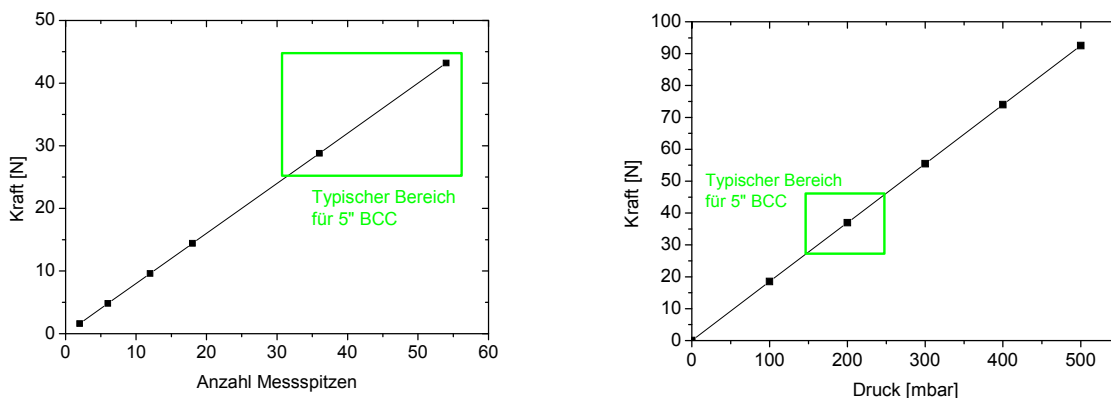


Abbildung 8.1: Kraftverhältnisse bei der Kontaktierung einer Rückkontaktsolarzelle, links Anpresskraft in Abhängigkeit von der Anzahl der Kontaktnadeln. Für eine typische Kontaktsituation einer solchen Solarzelle sind mind. 200-300 mbar Unterdruck notwendig (rechts, mit der Annahme einer Vakuumkanalfläche von 25 % der Zellfläche).

All diese Kräfte (vgl. Abbildung 8.1) müssen durch entsprechende Maßnahmen kompensiert werden. Als eine der einfachsten Methoden erscheint zunächst die Verwendung einer Glassplatte zum Anpressen der Solarzelle von der Vorderseite. Dabei muss jedoch die spektrale Transmission der Glasscheibe berücksichtigt werden. Der relative Verlauf dieser Transmission lässt sich einfach mittels einer Messung an einem geeigneten Spektrometer bestimmen. Der Absolutwert dieser Transmission hängt jedoch stark von der individuellen Messsituation ab. Randeffekte und Interreflexion zwischen Glas, Zelle und Messblock verstärken oder reduzieren die totale Transmission.

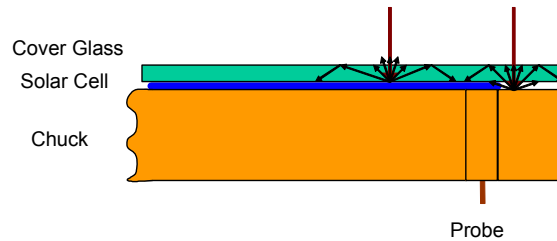


Abbildung 8.2: Schema einer Solarzelle auf einem Messblock mit einer Glasabdeckung auf der Frontseite zum Anpressen der Solarzelle.

Bei der Kalibrierung einer solchen Solarzelle in einem Kalibrierlabor wird der Kalibrierwert durch den Vergleich mit einer WPVS Referenzsolarzelle ermittelt. Wird mit dem Ziel, eine vergleichbare spektrale Einstrahlung zu erreichen, das Abdeckglas über die WPVS Referenzsolarzelle gelegt, kann man aufgrund der zur Situation der Messzelle andersartigen Messsituation andere Werte für die Randeffekte und die Interreflexion erwarten. Um diese erwartete Abweichung in einem Versuch zu quantifizieren wurden zwei verschiedenen WPVS Referenzsolarzellen (eine vergossene mit Glas und einer ohne Glas) mit einem Abdeckglas und drei verschiedenen Masken zur Variation der Apertur versehen. Der Vergleich der Messergebnisse in Abbildung 8.3 zeigt Variationen im Kurzschlussstrom der Referenzsolarzellen von bis zu 0.6 %. Damit ist die Abweichung vom tatsächlichen Wert jedoch noch nicht bestimmt.

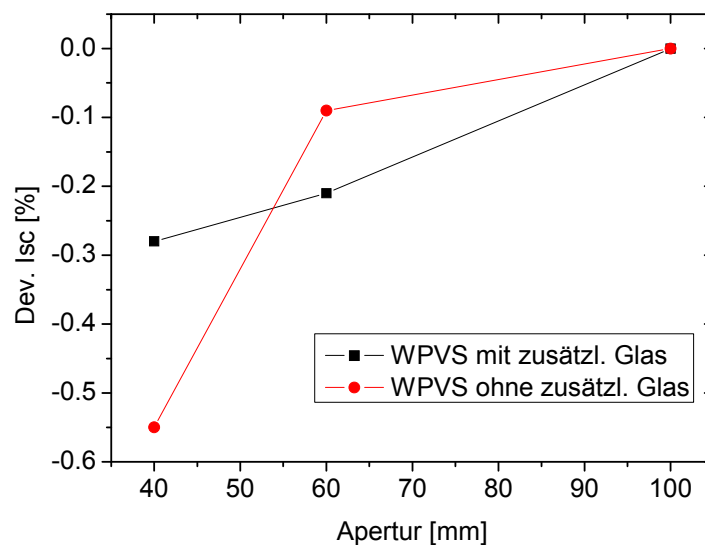


Abbildung 8.3: Stromabweichung einer WPVS Referenzsolarzelle mit und ohne Verglasung bei Verwendung eines zusätzlichen Abdeckglases und verschiedener Aperturen.

Dies zeigt, dass der Übertrag von kleinen hochgenau kalibrierten Solarzellen auf größere Industriesolarzellen bei Verwendung eines Abdeckglases nicht durchgeführt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, wie sie meist bei kleinen rückkontaktierten Laborsolarzellen angewandt wird, ist die Verwendung einer Maske, welche gleichzeitig zum Anpressen der Solarzelle verwendet wird und zusätzlich als Apertur bei der Messung dient. Bei solchen Messungen wird meist der Bereich der Solarzelle mit den Busbars komplett abgedeckt und verschattet. Eine solche Definition der bestrahlten Zellfläche wird als „designated illumination area“ bezeichnet und ist bei kleinen Solarzellen mit am Rand liegenden Kontaktflächen üblich. In diesem Bereich befinden sich die Busbars zur Kontaktierung der Zelle. Der Bereich des p-Busses (n-Typ Solarzellen) trägt nur wenig zum Strom der RSK Solarzelle bei, da die Breite der Metallisierung deutlich über den Diffusionslängen im mm-Bereich liegt. Am n-Bus hat

8 Kalibrierung spezieller Solarzellen

die Solarzelle einen durchgehenden Emitter und die Ladungsträgereinsammlung ist ähnlich effektiv wie im Bereich der Metallisierungsfinger.

Dies hat zur Folge, dass:

- bei transmittierenden Niederhaltern nur ein Niederhalter die Messung der gesamten Zellfläche wesentlich beeinflusst
- bei nichttransmittierenden Niederhaltern der n-Busbereich mit geringerer Performance nicht mitbewertet wird.

In Abbildung 8.4 sind zwei Varianten solcher Masken dargestellt. Die Gestaltung des Maskenrandes kann die Messung zusätzlich zur oben diskutierten Abschattung stark beeinflussen. Abgeschrägte Kanten (Abbildung 8.4 a)) können mittels diffuser Reflexion den Strom in der Solarzelle erhöhen. Ein abgestuftes Design wie in Abbildung 8.4 b) minimiert verfälschende Reflexionen.

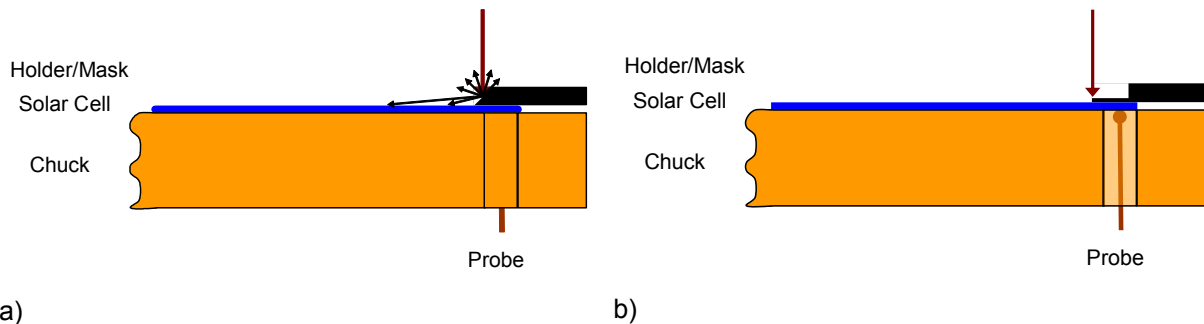


Abbildung 8.4: Schema einer Rückkontakt Solarzelle auf einem Messblock mit nicht-transmittierenden Haltern zum Anpressen der Solarzelle. Die Halter definieren gleichzeitig die Aperturfläche. Die Reflexion der Ränder der Apertur wird durch Anschrägen verstärkt (da teilweise diffuse Reflexion) und kann wie in b) minimiert werden.

Bei der Messung einer $2 \times 2 \text{ cm}^2$ RSK-Solarzelle wurde mit einer aus Pertinax gefertigten Maske und einem 45° geschrägten Rand eine Stromerhöhung von 5 % realisiert. Dies ist bei kleinen Zellen durch das große Rand-zu-Flächen Verhältnis möglich. Ein 3 mm breiter Rand vergrößert für diese Zellgröße die Zellfläche um 66 %.

Bei größeren Solarzellen mit am Rand liegenden Kontaktflächen (z.B. Sunpower RSK 5“) kann mit optimierten transparenten Niederhaltern am Rand eine vollflächige Bewertung („total area“) der Solarzelle erreicht werden.

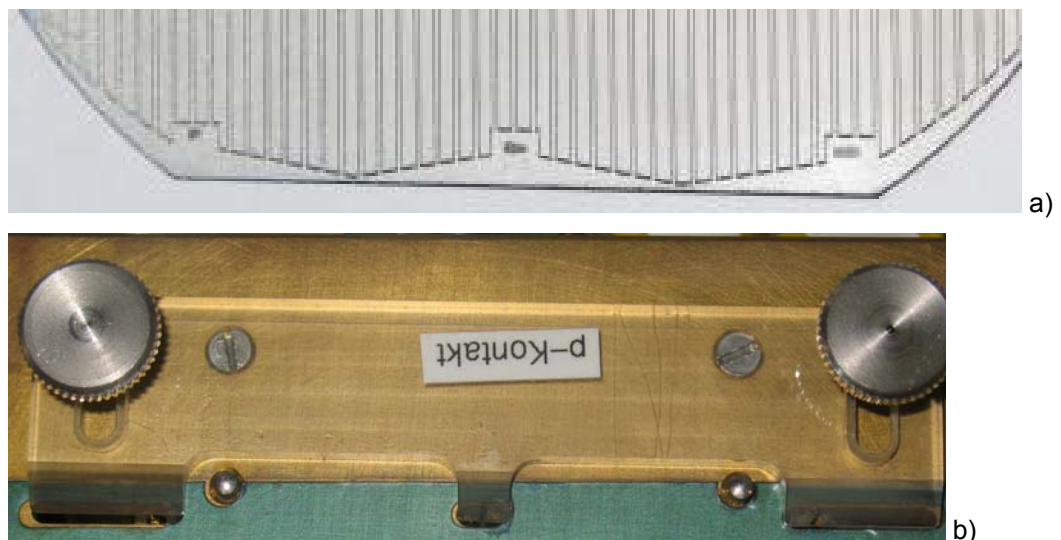


Abbildung 8.5: Kontaktflächen einer 5“ RSK-Solarzelle (a)) und ein Glas (WG295)-Niederhalter (b)) mit einem Anteil der abgedeckten Zellfläche von nur 0.57 %.

Der in Abbildung 8.5 b) gezeigte Niederhalter aus Glas mit einer minimierten Flächenbedeckung von 0.57 % der gesamten Solarzellenfläche einer quasi-quadratischen 5“ Solarzelle beeinflusst die Strommessung um maximal 0.11 %. Die Ausführung in WG295 Glas führt zu vernachlässigbarer spektraler Beeinträchtigung der Messungen.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde in Zusammenarbeit mit Markus Glatthaar [72] ein Messblockkonzept entwickelt, welches es erlaubt Rückkontakt Solarzellen sowohl thermisch als auch elektrisch zu kontaktieren und mittels Dauerbestrahlung von 1000 W/m^2 bei $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ zu kalibrieren, ohne dabei störende Einflüsse einer Glasscheibe oder von Niederhaltern berücksichtigen zu müssen.

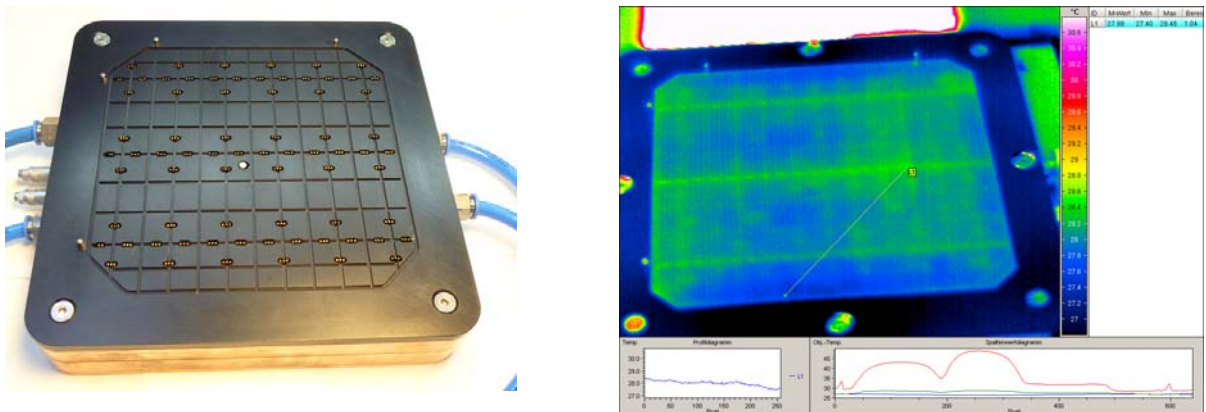


Abbildung 8.6: Messblock zur gleichzeitigen elektrischen und thermischen Kontaktierung einer 6“ MWT Solarzelle.

Der Messblock ist massiv aus Kupfer gefertigt und enthält Einfräsungen mit Zylindern, in welchen die Messspitzen befestigt werden. Die Zylinderflächen werden so angepasst, dass das ansaugende Vakuum die Zelle festhält und gleichzeitig mit geringerer Kraft die Messspitzen angedrückt werden, so dass die Solarzelle stets eben auf dem Messblock aufliegt.

8.2 Bifaciale Solarzellen

Solarzellen, deren Rückseite nicht vollständig metallisiert ist (s. auch Abschnitt 2.5), können bifaciale Eigenschaften haben. Dies bedeutet, dass die Solarzelle auch bei Bestrahlung ausschließlich von der Rückseite elektrische Leistung liefern. Solche Solarzellen werden nicht nur für bifaciale Anwendungen hergestellt, sondern oft ist die Bifacialität ein Nebenprodukt. Rückkontakt-Solarzellen haben aufgrund der Kontakttrennung auf der Rückseite Lücken in der Metallisierung, aber auch andere Solarzellen werden z.B. zur Materialeinsparung auf der Rückseite mit einem Kontaktmuster ähnlich zur Vorderseite hergestellt (z.B. Sanyo HIT).

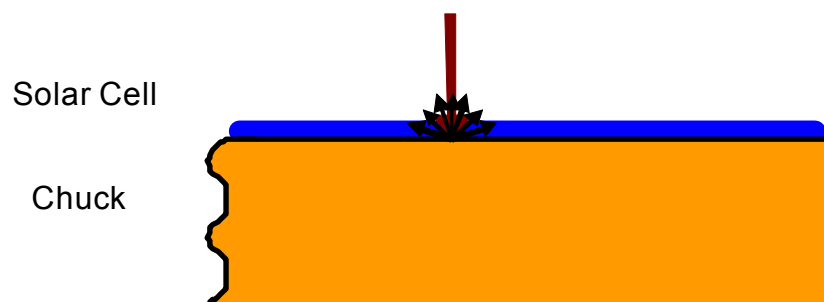


Abbildung 8.7: Bifaciale Silicium Solarzelle auf einem Metallmessblock transmittiert Strahlung, welche vom Messblock zurückreflektiert wird.

Der Strombeitrag durch die Rückreflexion des Messblockes kann mit Hilfe der Transmissionen und der spektralen Empfindlichkeiten beider Seiten einer Solarzelle berechnet werden:

$$\begin{aligned} SR_{\text{meas}}(\lambda) &= SR_{\text{front}}(\lambda) + SR_{\text{back,contrib}}(\lambda) \\ &= SR_{\text{front}}(\lambda) + T_{\text{Cell}}(\lambda)R_{\text{Chuck}}(\lambda)SR_{\text{back}}(\lambda) \end{aligned} \quad (8.1)$$

$$I_{\text{back,contrib}} = \int E(\lambda)T_{\text{Cell}}(\lambda)R_{\text{Chuck}}(\lambda)SR_{\text{back}}(\lambda)d\lambda \quad (8.2)$$

Der relative Strombeitrag ($X=I$) bzw. Beitrag zur spektralen Empfindlichkeit ($X=SR$) kann wie folgt berechnet werden:

$$rel.X_{\text{back,contrib}} = \frac{X_{\text{back,contrib}}}{X_{\text{front}}} \quad (8.3)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die gemessenen spektralen Empfindlichkeiten bereits Beiträge aus der Rückreflexion enthalten, jedoch diese die folgenden Abschätzungen im Wesentlichen in 2. Ordnung betreffen.

Um den Einfluss dieses Effektes zu quantifizieren wurden die spektralen Empfindlichkeiten (s. Abbildung 8.8) und die Transmission (s. Abbildung 8.9 a)) von verschiedenen Solarzellenkonzepten mit bifacialen Eigenschaften gemessen. Dabei wurde eine voll bifaciale Solarzelle (beidseitiges Griddesign) und drei unterschiedliche Rückkontaktsolarzellen untersucht. Des Weiteren wurden die (direkte und diffuse) Reflexion (s. Abbildung 8.9 b)) von unterschiedlichen Messblockmaterialien mit einem Carry 500i bestimmt.

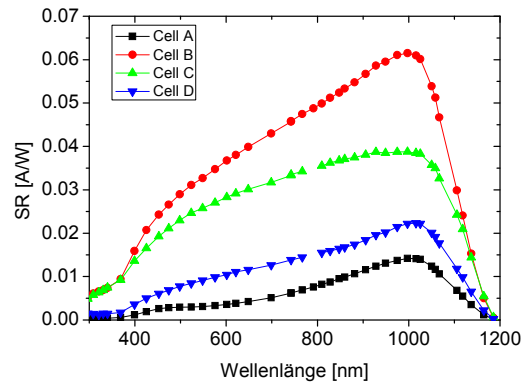
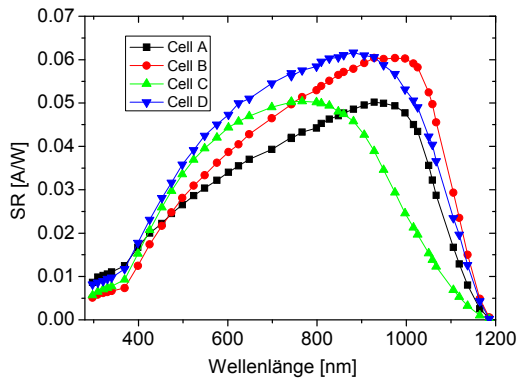
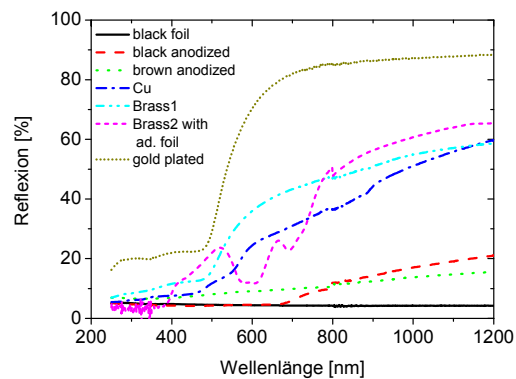
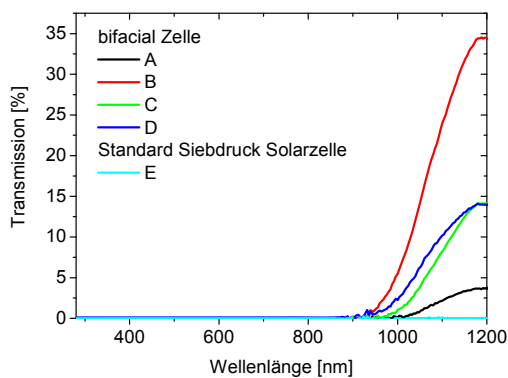


Abbildung 8.8: Spektrale Empfindlichkeiten von verschiedenen aktuellen Solarzellenkonzepten mit bifacialen Eigenschaften. Zelle B ist vollständig bifacial, d.h. sie generiert auf beiden Seiten ähnlich viel Strom. Zelle A, C und D sind Rückkontaktsolarzellen mit bifacialen Eigenschaften als Nebenprodukt des Solarzellenkonzeptes.



a)

b)

Abbildung 8.9: a) zeigt die Transmissionen der verschiedenen Solarzellen A bis D im Vergleich zur vollständig metallisierten Solarzelle E. b) zeigt die Reflexionen gemessenen an verschiedenen Oberflächen, welche für Solarzellenmessblöcke zum Einsatz kommen.

Aus diesen Daten und mit (8.1) bis (8.3) wurden für die verschiedenen Kombinationen die zusätzlichen Ströme aufgrund der Rückreflexion berechnet. Die spektral aufgelösten Beiträge in Abbildung 8.10 zeigen aufgrund der Transmission der Siliciumsolarzellen erst oberhalb 900 nm ansteigende Werte und sind für die verschiedenen Zelltypen von unterschiedlicher Größenordnung. Aufgrund der großen Unterschiede in der IR Empfindlichkeit von Zelle C von Vorder- zu Rückseite ergibt sich ein sehr hoher relativer Beitrag (vgl. Abbildung 8.10) der Rückseite.

8 Kalibrierung spezieller Solarzellen

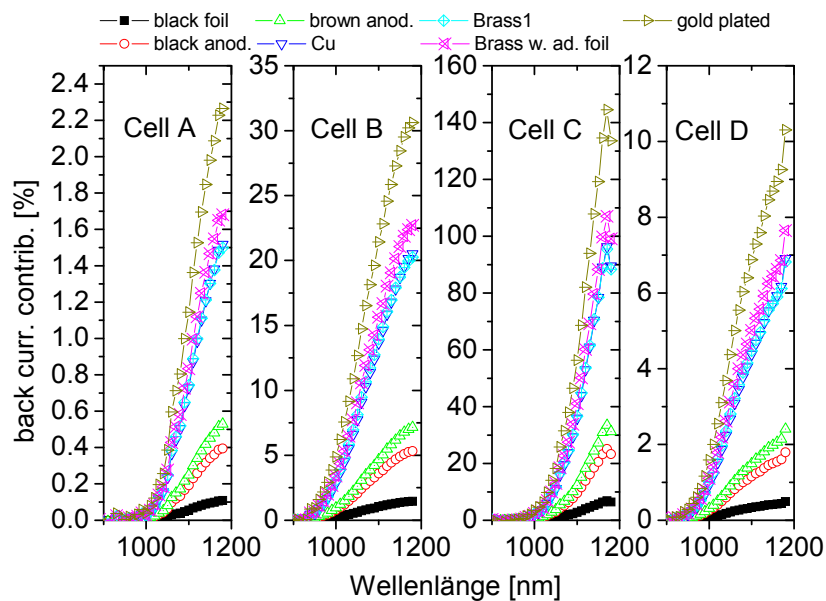


Abbildung 8.10: Diese Grafik zeigt die spektral aufgelösten Strombeiträge der Solarzellenrückseite im Verhältnis zum Strombeitrag der Vorderseite berechnet aus den gemessenen Transmissionen, Reflexionen und spektralen Empfindlichkeiten (man beachte die unterschiedlichen Skalen der y-Achsen).

Die integralen Strombeiträge sind in Tabelle 8.1 zusammengestellt. Für genaue Kalibrierungen und eine laborübergreifende Vergleichbarkeit sind Einflüsse > 0.1 % relevant.

back current contribution				
	Cell A	Cell B	Cell C	Cell D
black plastic foil	0.00%	0.05%	0.01%	0.03%
black anod.	0.01%	0.22%	0.06%	0.11%
brown anod.	0.00%	0.18%	0.05%	0.09%
Cu	0.02%	0.66%	0.17%	0.33%
Brass1	0.02%	0.69%	0.19%	0.34%
Brass w. ad. foil	0.02%	0.77%	0.20%	0.38%
Gold plated	0.03%	1.07%	0.30%	0.52%

Tabelle 8.1: Integrale Strombeiträge von der Solarzellenrückseite für ein Xenonlampen Sonnensimulator Spektrum (Klasse A).

Mit der vergoldeten Oberfläche werden erwartungsgemäß die höchsten Strombeiträge erreicht, jedoch bereits mit der Kupfer- oder Messingplatte treten signifikante Werte auf.

Um den Einfluss der bifacialen Eigenschaften von Solarzellen auf die Messung experimentell zu untersuchen wurde ein Messblock (s. Abbildung 8.11) entworfen, dessen Deckplatte austauschbar ist. Dieser Messblock kann 5“ Solarzellen mit einem Busbarabstand von 62.5 mm kontaktieren. Mit diesem Messblock lassen sich verschiedenen reflektierende Rückseiten realisieren. Die Oberfläche mit der höchsten Reflexion ist ein Aluminium Eloxal ohne zusätzliche Komponenten (natur). Um eine minimale Reflexion zu realisieren wurde eine schwarze Klebefolie mit < 5 % Reflexion aufgebracht. Versuche mit einer matt schwarz verchromten Messingplatte ergaben ähnlich gute Werte, jedoch ist diese elektrisch leitfähig, was die Messung im Vergleich zu den Eloxalen verfälschen könnte. Des Weiteren wurden ein

schwarzes und ein braunes Eloxal (Bronze 4/C34) verwendet. Da das schwarze Eloxal (EV6) auf den sichtbaren Spektralbereich optimiert ist, liegt die Reflexion im IR fast gleich hoch wie bei der natur (grau) eloxierter Platte.

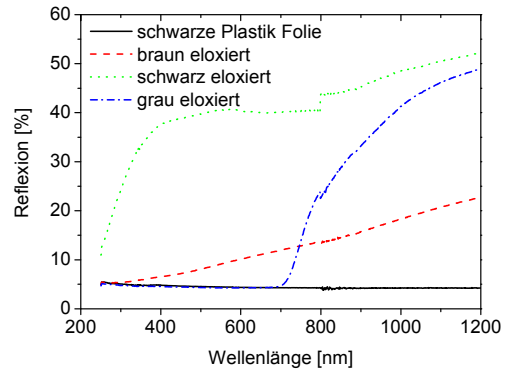
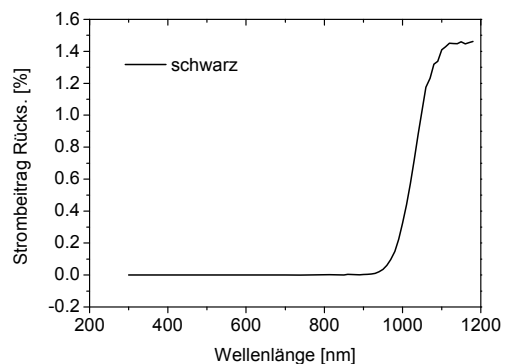
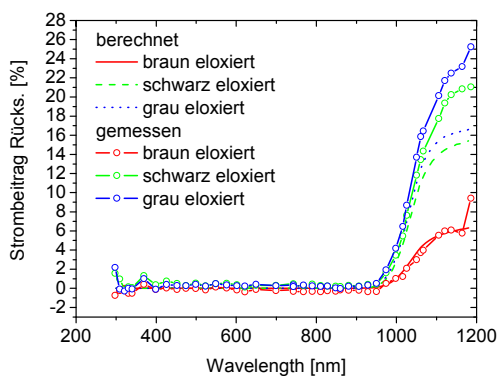


Abbildung 8.11: Messblock mit austauschbarer Deckplatte zur Variation der Reflexion.

Mit diesem Messblock wurde eine bifaciale Solarzelle (beidseitiges Grid) mit den unterschiedlich reflektierenden Deckplatten vermessen. Die gemessenen Daten wurden zur Auswertung auf die Messdaten mit der Deckplatte mit niedrigster Reflexion bezogen. Die so ermittelten zusätzlichen Strombeiträge in Abbildung 8.12 a) zeigen bei den beiden hoch reflektierenden Deckplatten um ca. 25 % höhere Werte als die Berechnung (s. Abb. 7.10) ergeben hatte. Ursache für diese Abweichung kann sehr gut die Tatsache sein, dass die für die Berechnung verwendeten spektralen Empfindlichkeiten mit direkter Strahlung (Randwinkel $< 4^\circ$) durchgeführt wurden, jedoch die Oberflächen auch mit einem diffusen Anteil reflektieren. Aufgrund der Totalreflexion bei bereits 17° beim Übergang ins Silicium treten hier höhere Empfindlichkeiten im infraroten Wellenlängebereich auf als bei direkter Einstrahlung.



a)

b)

Abbildung 8.12: a) Berechnete und gemessene Strombeiträge bei Verwendung unterschiedlicher Messblockoberflächen. Auffällig ist der höhere gemessene Strom im Vergleich zu den Berechnungen, sehr wahrscheinlich aufgrund des verbesserten Strahlungseinfangs durch die diffuse Reflexion an der Messblockoberfläche. b) Der spektral aufgelöste Strombeitrag der schwarzen Kunststoffolie liegt unter 2 % (integral: $I_{sc}(STC) < 0.05\%$).

Von diesem Vergleich ausgehend, lassen sich die verbleibenden Messfehler bei Verwendung einer niedrig reflektierenden Messblockdeckplatte abschätzen. Abbildung 8.12 b) zeigt die spektral aufgelösten berechneten Strombeiträge für eine Deckplatte, welche mit schwarzer Kunststoffolie (vgl. Abbildung 8.9 b)) beklebt ist. Selbst wenn man die Effizienzsteigerung von 25 % durch die diffuse Strahlung der

Deckplatte berücksichtigt, liegt der Beitrag spektral aufgelöst unter 2 % und integral unter 0.05 %. Die Größe des spektral aufgelösten Beitrags hängt stark vom Verhältnis $SR_{\text{front}}(\lambda)/SR_{\text{back}}(\lambda)$ der jeweiligen Solarzelle ab. Im Falle von Solarzelle C – mit einer geringen Empfindlichkeit im Langwelligen bei Einstrahlung von der Vorderseite, jedoch einer sehr hohen Effizienz in diesem Bereich von der Rückseite – liegt der relative Strombeitrag $SR_{\text{back}}(\lambda)$ im infraroten bei bis zu 150 % (vgl. Abbildung 8.10). Für die schwarze Folie würden der Beitrag bei 9 % und der integrale Wert bei 0.01 % liegen.

Für die Bewertung einer Solarzellenstruktur muss also ein Beitrag der Messung, welcher nicht allein auf den Solarzelleneigenschaften beruht, berücksichtigt werden. Für den Vergleich mit nicht bifacialen Solarzellen könnte man eine Albedo, vergleichbar mit Modulrückseitenfolien definieren. Solche Folien sind jedoch derzeit mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften im Einsatz (vgl. Abbildung 8.13).

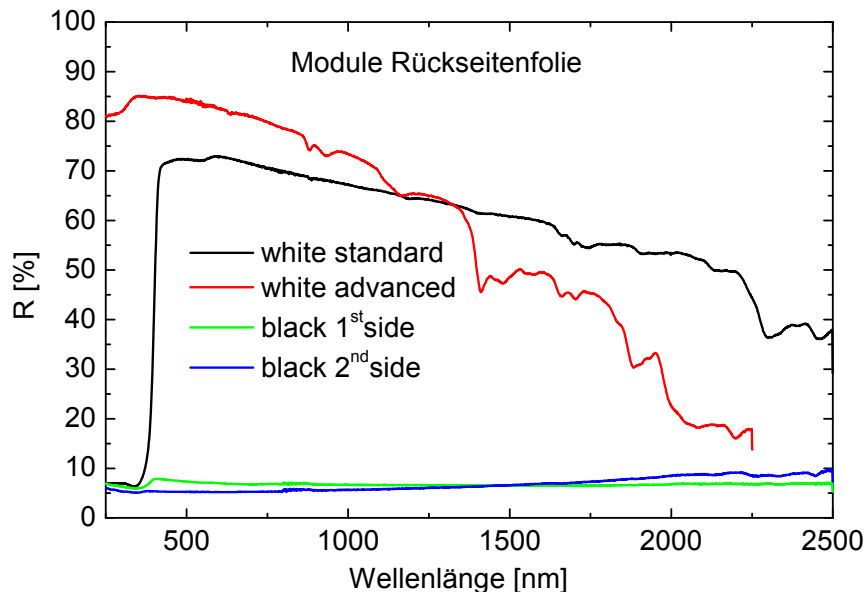


Abbildung 8.13: Die Reflexion verschiedener PV-Modul Rückseitenfolien.

Aufgrund der starken Winkelabhängigkeit der Rückseiteneffizienz müssten die winkelabhängigen Reflexionseigenschaften bei einer Definition berücksichtigt werden. Des Weiteren könnte der Luftspalt zwischen der Zelle und dem Messblock einen Einfluss auf die Einkopplung an der Rückseite haben. Dieser Luftspalt wird lokal variieren und ist eine Folge der Unebenheit der Zelle. Er wird auch vom Ansaugdruck abhängen.

Daher erscheint eine Definition einer hohen Albedo für eine genaue und hoch reproduzierbare Messung mit einer hohen Vergleichbarkeit und mit verschiedenen Messplätzen nicht sinnvoll.

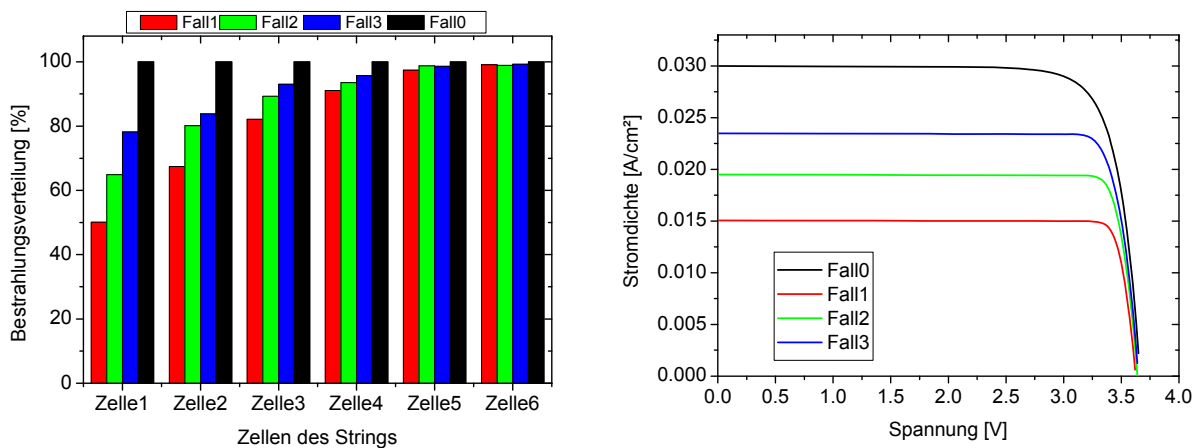
Für eine realistische Bewertung des Ertrages bifacialer Solarzellen aus den separierten Messungen von Vorder- und Rückseite müsste außer der Definition eines Albedo und der Geometrie des Solarempfängers auch die Linearität der Solarzelle berücksichtigt werden

8.3 Effekte bei serienverschalteten Solarzellen

Solarzellen werden für die Anwendung in sogenannten Strings in Reihe geschaltet um höhere Spannungen zu erreichen. Dünnschicht solarzellen werden in der Regel direkt in Form einer integrierten Serienschaltung hergestellt. Werden solche Messobjekte im Labor vermessen, so wirkt sich die Inhomogenität der Bestrahlung nicht nur auf den Kurzschlussstrom, sondern auf die gesamte IV-Kennlinie aus. Werden Solarzellen mit unterschiedlichen Photoströmen in Serie verschaltet, so begrenzt die Solarzelle mit dem geringsten Photostrom die gesamte Verschaltung. Bei Solarzellen mit mehr als einem pn-Übergang tritt eine solche Asymmetrie der Ströme aufgrund spektral selektiver Teilzellen auf [73]. Dabei sind größere Solarmodule mit Bypassdioden ausgestattet, welche eine zu hohe Rückwärtsbelastung einzelner Zellen bei Teilverschaltung verhindern [74]. Die Rückwärtsbelastbarkeit von Solarzellen ist stark verschieden. Bei Siliciumsolarzellen ist diese oft von der Materialqualität abhängig. So können mit monokristallinem Material Durchbruchspannungen > -20 V erreicht werden. Dagegen können Solarzellen aus Materialien mit geringerer Qualität bereits bei < -10 V durchbrechen [75].

Aus Berechnungen mit dem Zweidiodenmodell können IV-Kennlinien von Solarzellen mit unterschiedlichen Kurzschlussstromdichten bei deren Serienschaltung berechnet werden. Da eine inhomogene Verteilung der Bestrahlung (in erster Ordnung) nur eine inhomogene Verteilung der Photoströme verursacht, können diese Berechnungen auch auf den Fall eines Moduls mit Solarzellen unterschiedlicher Sortierung angewandt werden.

Berechnungen für eine inhomogene Bestrahlungsverteilung (s. Abbildung 8.14 a)), welche in einem Konzentratorsystem mit 6 serienverschalteten Solarzellen je nach Einsatz der konzentrierenden Optik entsteht, zeigen die Auswirkungen auf die resultierende IV-Kennlinie.



a)

b)

Abbildung 8.14: a) Strahlungsverteilung für 3 verschiedene Fälle gegenüber einer homogenen Verteilung (Fall 0). b) IV-Kennlinien für Strahlungsverteilungen 0-3 aus a).

Die Solarzelle mit dem geringsten Strom begrenzt die Serienschaltung, da aufgrund der geringen Stringspannung kein Rückwärtsdurchbruch die Kennlinie beeinflusst. Die Änderung der Kennlinienparameter in Abbildung 8.15 zeigt einen ansteigenden FF , welcher auf die hohen Spannungen der gefluteten Zellen beim I_{MPP} -Strom (durch die limitierende Zelle) des Gesamtsystems zurückzuführen ist.

8 Kalibrierung spezieller Solarzellen

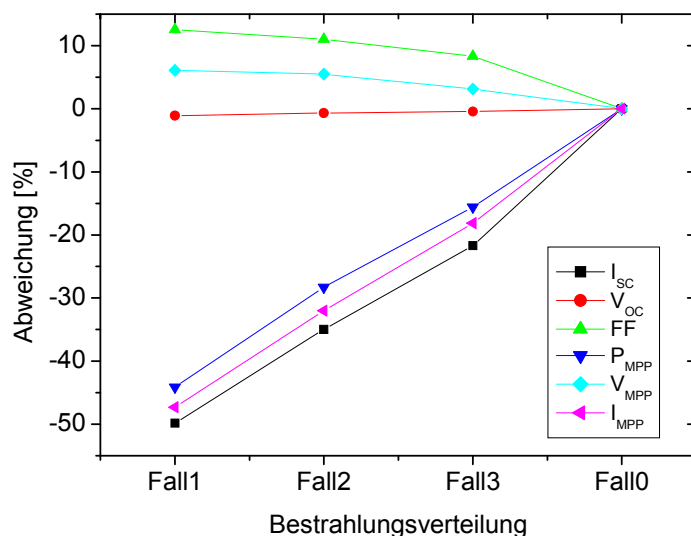
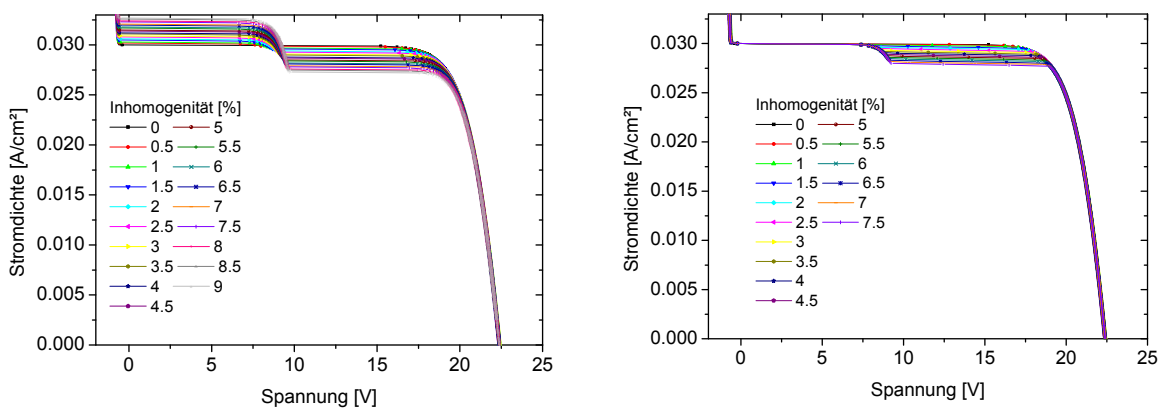


Abbildung 8.15: Berechnete Kennlinienparameter für die unterschiedlichen Bestrahlungsverteilungen in Abbildung 8.14

Die Gesamtleistung sinkt vor allem durch den reduzierten Kurzschlussstrom. Die Spannung ändert sich aufgrund ihrer geringen Abhängigkeit von der Einstrahlung nur geringfügig.

Werden Bypassdioden eingesetzt, so ändert sich das Verhalten der IV-Kennlinien hinsichtlich inhomogener Bestrahlung. Hierzu wurden IV-Kennlinien für Module mit unterschiedlicher String- und Zellenanzahl für unterschiedliche Verteilungen von inhomogener Bestrahlung berechnet.

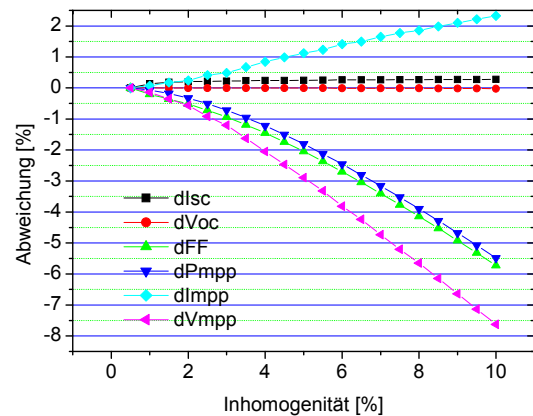
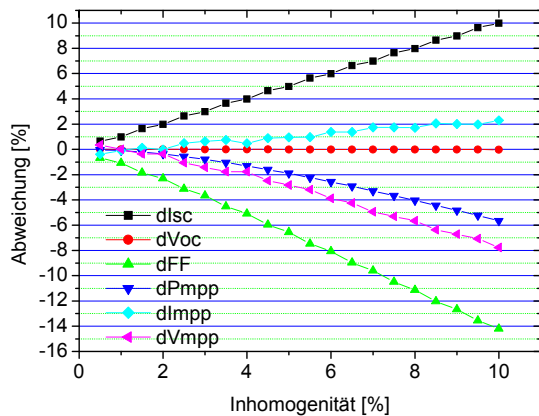


a)

b)

Abbildung 8.16: Modul mit 2 Strings (2 Bypassdioden) und 18 monokristallinen Solarzellen.

In Abbildung 8.16 sind IV-Kennlinien eines Solarmoduls mit 2 Strings (2 Bypassdioden) mit je 18 monokristallinen Solarzellen für zwei unterschiedliche Verteilungen der Bestrahlung dargestellt. Im Fall a) wurden die Photoströme eines Strings um X % erhöht und gleichzeitig die des anderen Strings um X % verringert. Im Fall b) wurde gegenüber Fall a) beim ersten String bei einer Solarzelle der Photostrom konstant gehalten. Auch nur die Änderung des Photostromes einer Solarzelle je String hätte annähernd dieselbe Auswirkung, da die Anzahl Solarzellen je Bypassdioden so ausgelegt sind, dass ein Rückwärtsdurchbruch einer einzelnen Solarzelle auszuschließen ist.



a)

b)

Abbildung 8.17: Modul ohne Bypassdiode mit 6 Zellen in einem Konzentratorsystem bei inhomogener Ausleuchtung.

Die Kennlinienparameter (s. Abbildung 8.17) zeigen für beide Fälle ein ähnliches Verhalten. Im Fall a) steigt der Kurzschlussstrom des Solarmoduls aufgrund der Bypassdioden linear mit der Inhomogenität an. Gleichzeitig sinkt im Bereich des P_{MPP} der Strom, so dass sich der Punkt maximaler Leistung zu niedrigeren Spannungen verschiebt.

Der Fall b) kommt einer Teilverschattung von X % gleich für 19 Solarzellen, aufgrund der Bypassdiode verändert sich der Kurzschlussstrom kaum. Er steigt aufgrund von Leckströmen durch den R_p der limitierenden Zelle leicht an. Die anderen Parameter verhalten sich ähnlich, jedoch mit deutlich geringerer Amplitude gegenüber Fall a).

Hiermit können die Messunsicherheiten für die Kennlinienparameter von Solarmodulen von Labormessungen abgeschätzt werden.

8.4 Zusammenfassung

In Kapitel 8 wurden Messungen an unterschiedlichen Silicium-basierten Solarzellen untersucht. Die Untersuchungen zur Messung an Rückkontakt-, bifacialen und serienverschalteten Solarzellen wurden detailliert dargestellt. Die Messungen und Berechnungen erlauben die Abschätzung von zusätzlichen Einflüssen und Messunsicherheiten auf die Messung solcher Solarzellen.

9 Zusammenfassung

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Kalibrierung und hochpräzise Bestimmung der Leistungsparameter von Solarzellen und der dazu notwendigen Messverfahren und Prozeduren. Dabei werden vor allem grundlegende Effekte und Ursachen der notwendigen Messungen oder spezialisierte Detailbetrachtungen für Siliciumsolarzellen betrachtet. Ein wesentlicher Teil der Arbeit befasst sich mit der Ursache spektraler Effekte. Kapitel 4 zeigt die vollständige Charakterisierung eines Diodenarray-Spektralradiometers auf. Dabei werden im Unterabschnitt 4.2 die speziellen Anforderungen für die Messung von Blitzspektren untersucht. Damit ermöglicht diese Arbeit hochgenaue rückgeführte Messungen an Blitzen, welche als Standardlichtquelle in der industriellen Produktion eingesetzt werden. Des Weiteren wird in Abschnitt 4.4 die Bewertung der Spektren entsprechend der IEC-Norm IEC60904-9 einschließlich ihrer Messunsicherheiten mittels einer Monte-Carlo Methode diskutiert. Die Betrachtungen im abschließenden Unterkapitel 4.5 zeigen, dass die Emissionslinien der Xenonentladungslampen von einem Spektrometer mit endlicher optischer Auflösung ausreichend genau wiedergegeben werden.

In Kapitel 5 sind die Untersuchungen zur Messung der spektralen Empfindlichkeit von großen Industriesolarzellen zusammengefasst. Die hierbei angewandte differentielle Messmethode erfordert eine Berücksichtigung der Linearität der Solarzelle, welche durch die in dieser Arbeit für Kalibrierungen weiterentwickelte Methode nun ausreichend möglich ist. In Unterabschnitt 5.1.7 ist die Auswirkung des Parallelwiderstandes (R_P) der Solarzelle auf die Messung durch das Zusammenspiel mit der Messelektronik mittels Simulationsrechnungen gezeigt. Erst diese Arbeiten ermöglichen eine Bewertung der Absolutwerte der spektralen Empfindlichkeitsmessungen von Solarzellen mit niedrigem R_P .

In Kapitel 6 werden die Messunsicherheiten für die IV-Kennlinienmessung zusammengefasst. Dabei steht die Unsicherheit des spektralen Mismatchfaktors im Mittelpunkt. Die Fehlerfortpflanzung mittels eines Monte-Carlo-Verfahren zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher spektraler Anpassungen von Referenz und Testsolarzelle auf die Messunsicherheit. Diese Ergebnisse validieren den in Abschnitt 3.3 entwickelten Anpassungsindex als eine geeignete Größe zur Beurteilung der spektralen Anpassung. Eine eingehende Analyse deckt die relevanten Wellenlängenbereiche auf und ermöglicht so erstmals eine gezielte Optimierung spektraler Verteilungen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Kontaktierungen der Solarzellen an der Busbar-Metallisierung auf die Kennlinienmessung zeigen die Notwendigkeit einer Standardisierung. Die in Abschnitt 6.3.2 untersuchte Messung der Solarzellentemperatur zeigt die Grenzen der Genauigkeit radiometrischer Messungen (wie sie in der industriellen Produktion eingesetzt werden) aufgrund der relativ geringen Emissivitäten der Solarzellenoberflächen, auf. Die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit bei der Mismatchkorrektur ermöglicht nun hochgenaue, rückführbare Messungen der Temperaturkoeffizienten der IV-Parameter unter Berücksichtigung der Forderungen der neuen Norm zur Bestimmung des Jahresertrages (IEC61583).

Kapitel 7 fasst die für Solarzellenreferenzen durchgeführten Untersuchungen zusammen. Neben der Untersuchung von Randeffekten und Degradation verkapselter Solarzellen wurden vor allem Kriterien für die Auswahl geeigneter Solarzellen entwickelt. Dabei konnte der in Abschnitt 3.3 entwickelte Anpassungsindex angewandt werden. Die Entwicklung eines teilverkapselten Referenzelementes aus großen 6^{er} Industriesolarzellen schließt das Kapitel ab.

Kapitel 8 betrachtet die speziellen Anforderungen bestimmter Zellestechnologien. Die Arbeiten führten zu einem Kontaktierungskonzeptes für Rückkontaktsolarzellen, so dass nun rückführbare Messungen möglich sind. Für bifaciale Solarzellen wurde eine Datenbasis erarbeitet, so dass die Einflüsse der Reflexionen des Messchucks abgeschätzt werden können. Modellrechnungen für serienverschaltete Solarzellen (Module) unter inhomogener Beleuchtung zur Abschätzung der Messunsicherheiten schließen das Kapitel.

10 Anhang

10.1 Wechsel des Normspektrums AM1.5g

Im Laufe dieser Arbeit wurde durch die IEC (TC 82) das allen Solarzellenmessungen zugrundeliegende Spektrum neu definiert. Daher kann es Vorkommen, dass sich Grafiken oder Berechnungen auf das Alte Normspektrum beziehen. Die Revision der spektralen Verteilung hat jedoch vorwiegend Auswirkungen auf die absoluten Messwerte in den unten genannten Größenordnungen, jedoch sind die Betrachtungen zu Messunsicherheiten darüber hinaus gültig.

Die Messbedingungen für terrestrische Solarzellen sind in der Norm IEC 60904-3 festgelegt. Einer der wichtigsten Bestandteile der Standard Test Bedingungen (STC: Standard Testing Conditions) ist die spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke, welche als AM1.5G bekannt ist. Die Definition dieser spektralen Verteilung basiert auf atmosphärischen Daten und Umgebungsbedingungen. Hierzu gehört:

- Einstrahlungswinkel zur Horizontalen
- Albedo der Umgebung (Untergrund)
- Wassergehalt der Atmosphäre
- Ozongehalt der Atmosphäre
- Trübung

Die Daten der spektralen Verteilung im alten Standard IEC 60904.3 Ed. 1(1989) [76] wurden mit dem Softwaremodell BRITE bestimmt. Dieser Datensatz hatte verschiedene Mängel:

- Er konnte nicht mehr mit BRITE reproduziert werden
- Die Geometrie des Solarempfängers war nicht genau definiert
- Die Auflösung der Daten war gering und mit unregelmäßigen Abständen
- Die meteorologischen Daten im Model waren inkonsistent
- Die Daten in Ed.1 (1989) enthielten Schreibfehler

Daher wurde die spektrale Verteilung durch das TC 82 (Technical Committee) der Internationalen Elektrotechnischen Commission (IEC) revidiert.

Die neue spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke des AM1.5G nach IEC 60904-3 Ed.2 (2008) basiert auf einem neuen meteorologischen Datensatz, hat eine höhere Auflösung, einen größeren Bereich im UV und basiert auf einem aktualisierten Computermodell (SMARTS). Dieses ist frei verfügbar [77].

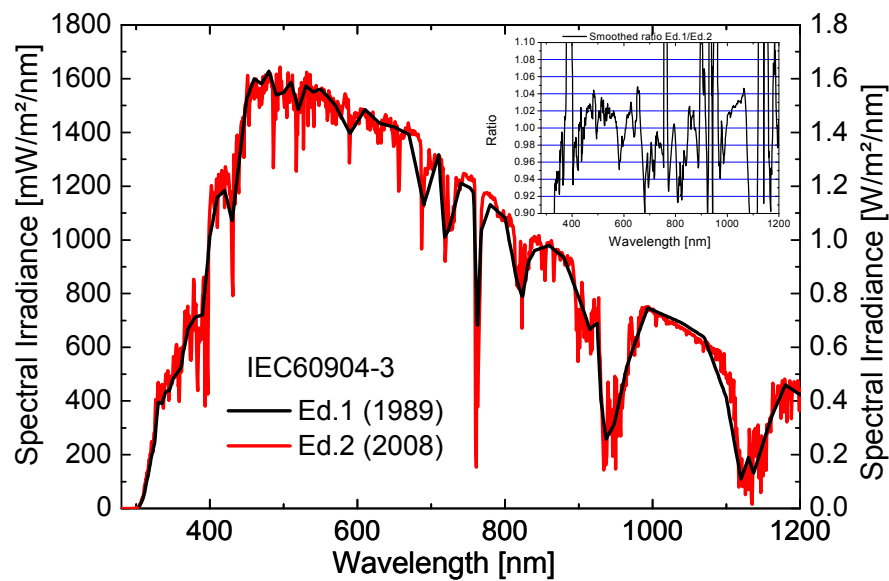


Abbildung 10.1: Alte (Ed. 1 (1989)) und neue (Ed.2 (2008)) spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke nach IEC60904-3. Das Verhältnis beider Kurven ist zu klein dargestellt und wurde zur besseren Übersicht min einer Breite von 10 nm geglättet.

Der Vergleich in Abbildung 10.1 zeigt die deutlich höhere Auflösung des Ed. 2 (2008). Des Weiteren wurden die Einheiten von $[mW/m^2/nm]$ in $[W/m^2/nm]$ geändert. Nicht nur die höhere Auflösung, auch die geänderten Eingangsparameter haben den spektralen Verlauf geändert.

Diese Änderungen wirken sich auch auf die STC Messwerte der Messobjekte aus. Da der Kurzschlussstrom sich in erster Ordnung linear mit der Einstrahlung ändert, kann der Kurzschlussstrom $I_{SC}(STC)$ bei Kenntnis der spektralen Empfindlichkeit der Solarzellen ($SR(\lambda)$) berechnet werden:

$$I_{SC}(STC) = \int SR(\lambda)E_{AM1.5G}(\lambda)d\lambda \quad (10.1)$$

Mit der jeweiligen spektralen Verteilung $E_{AM1.5G}(\lambda)$.

Die Auswirkungen auf die Kurzschlussströme von Solarzellen mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten sind unterschiedlich. Die Änderung der Kurzschlussströme von Ed.1 (1989) nach Ed.2 (2008) kann wie folgt berechnet werden:

$$\Delta I_{SC} = \frac{\int sr(\lambda)E_{AM1.5G}^{Ed.1}(\lambda)d\lambda}{\int sr(\lambda)E_{AM1.5G}^{Ed.2}(\lambda)d\lambda} \quad (10.2)$$

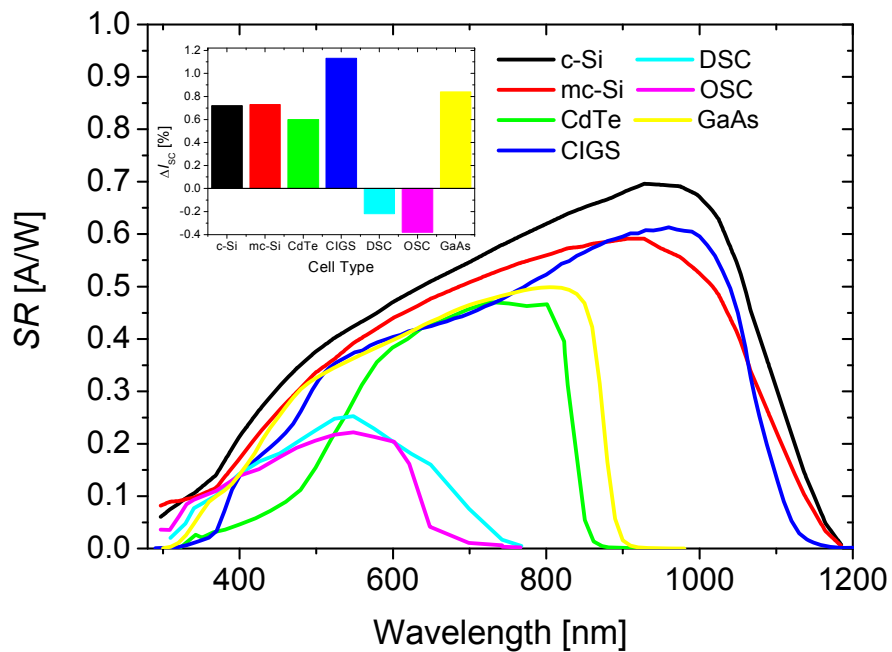


Abbildung 10.2: Typische spektrale Empfindlichkeiten von verschiedenen Solarzellentechnologien und die relative Änderung ihrer Kurzschlussströme.

Für verschiedene Solarzellentechnologien sind die spektralen Empfindlichkeiten und die aus Gleichung (10.2) berechneten relativen Abweichungen dargestellt. rot empfindliche Solarzellentechnologien gewinnen Strom hinzu, bei anderen reduziert sich der Kurzschlussstrom unter STC leicht. Weitere Betrachtungen sind in [78] und [79] zu finden.

10.2 Abkürzungen

Variable	Einheiten	Bedeutung
$\mu_{n,p}$	[m ² /Vs]	Mobilität der Elektronen bzw. Löcher
A	[cm ²]	Fläche
$\alpha(\lambda)$	[1/m]	Absorptionskoeffizient
$D_{n,p}$	[cm ² /s]	Diffusionskonstante der Elektronen bzw. Löcher
DSR	[A/W]	Differentielle Spektrale Empfindlichkeiten
E	[V/m]	Elektrisches Feld
E_0	[eV]	Bandlückenenergie bei 0K
E_C	[eV]	Energieniveau des Leitungsbandes
E_g	[eV]	Bandlückenenergie
E_t	[eV]	Energieniveau eines Defekts
E_V	[eV]	Energieniveau des Valenzbandes
$F(\lambda)$	[1/s]	Photonenfluss
FF	[%]	Füllfaktor
$f_h^{1,2}$	[1]	Homogenitätskorrekturfaktor
$G(x)$	[1/s]	Generationsrate
I	[A]	Strom
$I_{01,02}$	[A]	Diodensättigungsströme
I_{ph}	[A]	Photostrom
I_{SC}	[A]	Kurzschlussstrom
$j^{diff,field}$	[mA/cm ²]	Diffusions- bzw. Feldstromdichte
J_{SC}	[mA/cm ²]	Stromdichte
$L_{n,p}$	[cm]	Diffusionslänge der Elektronen bzw. Löcher
M	[1]	spektraler Mismatchfaktor
n, n_1	[cm ⁻³]	Dichte der Elektronen
$N_{A,D}$	[cm ⁻³]	Dotierkonzentration (Akzeptoren bzw. Donatoren)
N_C	[cm ⁻³]	effektive Zustandsdichte der Elektronen im Leitungsband
n_i	[cm ⁻³]	intrinsische Ladungsträgerdichte
n_s, p_s	[cm ⁻³]	Dichte der Elektronen bzw. Löcher an einer Oberfläche
p	[cm ⁻³]	Dichte der Löcher
P_{MPP}	[W]	Punkt maximaler Leistung
R	[Ω]	Widerstand
R'	[%]	Reflexion

10 Anhang

R_P	[Ω]	Parallelwiderstand
R_S	[Ω]	Serienwiderstand
$S_{n,p}$	[cm/s]	Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit der Elektronen bzw. Löcher
$SR(\lambda)$	[A/W]	absolute spektrale Empfindlichkeit
$sr(\lambda)$	[A/W]	relative spektrale Empfindlichkeit
T	[$^{\circ}\text{C}$]	Temperatur
$\tau_{n,p}$	[ms]	Elektronen- bzw Löcherlebensdauern
$U(x)$	[1/s]	Rekombinationsrate
U_{Mon}	[mV]	Monitorspannung
$U_{Mon1,TC,M}$	[mV]	Monitorspannung (Monitorzelle1) bei Messung der Testzelle
$U_{Mon2,RC,R}$	[mV]	Monitorspannung (Monitorzelle2) bei Messung der Referenzzelle
U_{OC}	[V]	offene Klemmenspannung
V_g	[V]	Bandlückenspannung: E_g/q
V_t	[V]	Thermische Spannung: k_b/q

10.3 Symbole

Symbol	Bedeutung
AM1.5g	Normspektrum mit 1.5-facher Luftmasse (Airmass) global
AMX	Normspektrum X
BGN	Bandgap-Narrowing
EWT	Emitter-Wrap-Through Solarzelle
FEL	Quarzhalogenlampe (brennt sehr stabil, für Kalibrierzwecke)
GUM	"Guide to the expression of uncertainty in measurement" / „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“
JRC	Joint Research Center (Ispra,EU)
M	spektraler Mismatchfaktor
Mon	Monitorzelle
MWT	Metal-Wrap-Through Solarzelle
NREL	National Renewable Energy Laboratory (Colorado, USA)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RC	Referenzzelle
SIM	Simulator
SRH	Shockley-Read-Hall
STC	Standard Test Bedingungen
TC	Testzelle
WLR	White light response method

10.4 Naturkonstanten

Symbol	Wert	Bedeutung
c	$2.998 \cdot 10^8$ m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
h	$6.626 \cdot 10^{-34}$ Js	Planck'sches Wirkungsquantum
k_B	$1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K	Boltzmannkonstante
q	$1.602 \cdot 10^{-19}$ C	Elementarladung

10.5 Veröffentlichungen

- J. Hohl-Ebinger, Diplomarbeit, Untersuchung zur Messung der spektralen Empfindlichkeit von Solarzellen und -modulen. 2004, Albert-Ludwigs Universität Freiburg.
- J. Hohl-Ebinger, A. Hinsch, R. Sastrawan, W. Warta, and U. Würfel, Dependence of Spectral Response of Dye Solar Cells on Bias Light Illumination. in Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2004. Paris, France: WIP-Munich, ETA-Florence: p. 173-5.
- J. Hohl-Ebinger, G. Siefer, and W. Warta, Non-Linearity of Solar Cells in Spectral Response Measurements. in Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2007. Milan, Italy.
- J. Hohl-Ebinger, G. Siefer, and W. Warta, Measuring the Spectral Distribution of a Flash Simulator. in Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2007. Milan, Italy.
- J. Hohl-Ebinger and W. Warta, Investigation of Large Area Cell and Module Spectral Response Measurement. in Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2004. Paris, France: p. 2611-4.
- J. Hohl-Ebinger, D. Grote, B. Hund, A. Mette, and W. Warta, *Contacting Bare Solar Cells for STC Measurements*. in Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2008. Valencia, Spain.
- J. Hohl-Ebinger and W. Warta, Bifacial Solar Cells in STC Measurements. in Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2010. Valencia, Spain: WIP-Munich.
- J. Hohl-Ebinger and W. Warta, Uncertainty of the Spectral Mismatch Correction Factor in STC Measurements on Photovoltaic Devices. Prog. Photovolt: Res. Appl. (2010), Volume 19
- H. Seifert, J. Hohl-Ebinger, U. Würfel, B. Zimmermann, and W. Warta, *Determining the Junction Temperature for STC Measurements of Thin Film Solar Cell*. in Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2009. Hamburg, Germany.
- C. Siegers, J. Hohl-Ebinger, B. Zimmermann, U. Würfel, R. Mülhaupt, A. Hinsch, and R. Haag, *A Dyadic Sensitizer for Dye Solar Cells with High Energy-Transfer Efficiency in the Device*. ChemPhysCem, 2007. **8**(10): p. 1548-1556.
- C. Siegers, U. Würfel, M. Zistler, H. Gores, J. Hohl-Ebinger, A. Hinsch, and R. Haag, *Overcoming Kinetic Limitations of Electron Injection in the Dye Solar Cell via Co-Adsorption and FRET*. ChemPhysCem, 2008. **9**: p. 793-798.
- C. Siegers, B. Oläh, U. Würfel, J. Hohl-Ebinger, A. Hinsch, and R. Haag, *Donor-Acceptor-Functionalized Polymers for Efficient Light Harvesting in the Dye Solar Cell*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008. **93**: p. 552-563.
- K. Kiefer, W. Warta, J. Hohl-Ebinger, W. Herrmann, and N. Heisterkamp, *Optimisation of the Power Measurement of Silicon Photovoltaic Modules*. in Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2006. Dresden, Germany.
- R. Gottschalg, T.R. Betts, D.G. Infield, W. Kolodenny, M. Prorok, T. Zdanowicz, N. van der Borg, H. De Moor, G. Friesen, W. Herrmann, J. Hohl-Ebinger, J. Diaz Berrade, J. Moracho, A.B. Cueli, and A.R. Lagunas, *Variability of Electrical Parameters Determined by Using Different Solar Simulation Systems for Different PV Module Technologies*. in Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2006. Dresden, Germany.
- A. Krieg, A. Weil, E. Schäffer, J. Hohl-Ebinger, W. Warta, and S. Rein, Accuracy of Inline IV Measurements Under Industrial Conditions. in Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2007. Milan, Italy.
- R. Gottschalg, T.R. Betts, J. Hohl-Ebinger, W. Herrmann, and H. Müllejans, Effect of Spectral Mismatch on Power rating Measurements - A Comparison of Indoor and Outdoor Measurements for Single and Multi-Junction Devices. in Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2007. Milan, Italy.

- S. Winter, D. Friedrich, B. Ortel, A. Sperling, M. Hermle, J. Hohl-Ebinger, and W. Warta, Non-Linearity of Solar Cells due to Non-Linear Effects Within the Surrounding Area of the Active Cell. in Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2008. Valencia, Spain: p. 1897-1899.
- B. Hund, N. Ackermann, J. Hohl-Ebinger, M. Schädel, W. Warta, and S. Winter, *Possible Impact of Systematic Errors in IV-Measurement*. in Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2008 Valencia, Spain.
- T. Roth, J. Hohl-Ebinger, E. Schmich, W. Warta, S. Glunz, and R. Sinton, *Improving the Accuracy of Suns-Voc Measurements Using Spectral Mismatch Correction*. in 33rd IEEE PVSC. 2008. San Diego, CA.
- T. Roth, J. Hohl-Ebinger, D. Grote, E. Schmich, W. Warta, S. Glunz, and R. Sinton, *Illumination-Induced Errors Associated with Suns-Voc Measurements of Silicon Solar Cells*. Review of Scientific Instruments, 2009. **80**.
- T.R. Betts, T. Zdanowicz, M. Prorok, W. Kolodenny, H. De Moor, N. van der Borg, D. Stellbogen, J. Hohl-Ebinger, W. Warta, G. Friesen, D. Chianese, A. Guerin de Montgareuil, W. Herrmann, J. Diaz Berrade, J. Moracho, A.B. Cueli, A.R. Lagunas, and R. Gottschalg, *Photovoltaic Performance Measurements in Europe: PV-Catapult Round Robin Tests*. in 4th WCPEC. 2006. Hawaii.
- W. Warta, J. Hohl-Ebinger, A. Ohm, K. Kordelos, S. Winter, R. Adelhelm, D. Berger, H.P. Hartmann, D.H. Neuhaus, M. Wald, T. Kieliba, H. Albert, B. Hund, J. Isenberg, H. Nagel, J. Fölsch, P. Grabitz, and W. Lattwein, *Precise Measurement of Solar Cell Performance in Production*. in Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2009. Hamburg, Germany.
- M. Glatthaar, A. Krieg, M. Greif, L. Greco, J. Hohl-Ebinger, F. Clement, S. Rein, W. Warta, and R. Preu, *Accurate IV-Measurement for Rear Contact Solar Cells*. in Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2010. Valencia, Spain.
- T.R. Betts, T. Zdanowicz, M. Prorok, W. Kolodenny, H. de Moor, N.v.d. Borg, D. Stellbogen, J. Hohl-Ebinger, W. Warta, G. Friesen, D. Chianese, A.G. de Montgareuil, W. Herrmann, J.D. Berrade, J. Moracho, A.B. Cueli, A.R. Lagunas, R. Gottschalg, and Ieee, *Photovoltaic performance measurements in Europe: PV-Catapult round robin tests*. Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vols 1 and 2. 2006. 2238-2241.

10.6 Literatur

1. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit*. 2003, Berlin, Germany: Springer Verlag.
2. EPIA, *Global Market outlook for Photovoltaics until 2014*. 2010, EPIA - European Photovoltaic Industrie Association
3. gtaï. *Industry & Market Numbers*. 2011 [cited 2011 25.05.]; Available from: <http://www.gtai.com/homepage/industries/pv-industry/>.
4. K. Heidler and J. Beier, *Uncertainty Analysis of PV Efficiency Measurements with a Solar Simulator: Spectral Mismatch, Non-Uniformity and other Sources of Error*. in *Proceedings of the 8th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 1988. Florence, Italy: p. 554-59.
5. S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. 2 ed. 1981, New York, New York, USA: John Wiley and Sons. 868.
6. A.L. Fahrenbruch and R.H. Bube, *Fundamentals of Solar Cells*. 1983, New York, New York, USA: Academic Press. 558.
7. M.A. Green, *Silicon Solar Cells Advanced Principles and Practice*. 1995, Sydney, Australia: Centre for Photovoltaic Devices and Systems University of New South Wales. 366.
8. P. Würfel, *Physics of Solar Cells - From principles to new concepts*. 2005, Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KgaA.
9. M.A. Green, *Solar Cells, Operating Principles, Technology and System Applications*. 1 ed. 1982, Rosebery, NSW: Bridge Printery.
10. M.A. Green, *Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications*. 1986, Kensington, Australia: University of New South Wales. 274.
11. W.D. Eades and R.M. Swanson, *Calculation of surface generation and recombination velocities at the Si-SiO₂ interface*. *Journal of Applied Physics*, 1985. **58**(11): p. 4267-76.
12. Y.P. Varshni, *Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors*. *Physica*, 1967. **34**(1): p. 149-54.
13. M.A. Green, *Silicon Solar Cells Advanced Principles and Practice*. 1995, Sydney, Australia: Centre for Photovoltaic Devices and Systems University of New South Wales. 366.
14. M. Hermle *Fachbereich für Physik, Analyse neuartiger Silizium- und III-V-Solarzellen mittels Simulation und Experiment*. 2008, Universität Konstanz: Freiburg im Breisgau. p. 198.
15. A.B. Sproul and M.A. Green, *Intrinsic carrier concentration and minority-carrier mobility of silicon from 77 to 300 K*. *Journal of Applied Physics*, 1993. **73**(3): p. 1214-25.
16. P.P. Altermatt, A. Schenk, F. Geelhaar, and G. Heiser, *Reassessment of the intrinsic carrier density in crystalline silicon in view of band-gap narrowing*. *Journal of Applied Physics*, 2003. **93**(3): p. 1598-604.
17. M.C. Schubert, J. Isenberg, M. Rinio, and W. Warta, *Temperature dependent carrier lifetime images*. in *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2004. Paris, France: WIP-Munich, ETA-Florence: p. 500-3.

18. D.B.M. Klaassen, *A unified mobility model for device simulation. I. Model equations and concentration dependence*. Solid-State Electronics, 1992. **35**(7): p. 953-9.
19. G. Siefert *Fachbereich Physik, Analyse des Leistungsverhaltens von Mehrfachsolarzellen unter realen Einsatzbedingungen*. 2008, Universität Konstanz: Konstanz, Germany. p. 176.
20. A.B. Sproul, M.A. Green, and A.W. Stephens, *Accurate determination of minority carrier- and lattice scattering-mobility in silicon from photoconductance decay*. Journal of Applied Physics, 1992. **72**(9): p. 4161-71.
21. M. Rüdiger, M. Rauer, C. Schmiga, and M. Hermle, *Accurate Modeling of Aluminum-doped Silicon*. Energiy Procedia, 2011. **00**.
22. S. Elies *Fachbereich Elektrotechnik, Entwurf eines verbesserten Ersatzschaltbildes für Solarzellen*. 2008, Fachhochschule Lübeck.
23. S. Elies, M. Hermle, and B. Burger, *Improved Two-Diode Model for More Detailed Simulation of I-U-Curves for Solar Cells and Modules*. in *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2009. Hamburg, Germany: p. 3737ff.
24. A.G. Aberle, S. Glunz, and W. Warta, *Impact of illumination level and oxide parameters on Shockley-Read-Hall recombination at the Si-SiO₂ interface*. Journal of Applied Physics, 1992. **71**(9): p. 4422-31.
25. R.M. Swanson, *Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells*. in *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2005. Orlando, Florida, USA: p. 889-94.
26. H. Müllejans, W. Zaaiman, F. Merli, E.D. Dunlop, and H.A. Ossenbrink, *Comparison of traceable calibration methods for primary photovoltaic reference cells*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2005. **13**(8): p. 661-71.
27. A. Schmitz, *Primärkalibrierung von Strahlungsempfängern*. 1998, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. B.
28. W. Zaaiman, H. Muellejans, E.D. Dunlop, and H. Ossenbrink, *Si Traceability for Irradiance Transfer Standards to Silicon Solar Cells Using Direct and Global Irradiance*. in *Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference 2006*. Dresden, Germany: p. 64-8.
29. J. Metzdorf, *Calibration of Solar Cells. 1: The Differential Spectral Responsivity Method*. Applied Optics, 1987. **26**(9): p. 1701-1708.
30. IEC 60904-3 (Ed. 2), *Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*. 2008.
31. IEC 60904-7, *Photovoltaic devices - Part 7: Computation of spectral mismatch error introduced in the testing of a photovoltaic device*. 1998.
32. J. Meier, R. Adelhelm, J. Hötzel, D. Romang, S. Bengali, and U. Kroll, *Reference Cells in WPVS Design for Precise Miromorph PV Power Measurements*. in *Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2010. Valencia, Spain: WIP.
33. ISO, *GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. 2008.
34. academic. [cited 24.01.2011]; Available from: <http://de.academic.ru/pictures/dewiki/67/Czerny-turner.png>.
35. Zeiss, *Product Information MCS 5.9.8*.

36. photonicsonline. [cited 24.01.2011]; Available from: <http://www.photonicsonline.com/product.mvc/SU256512-LD-InGaAs-Linear-Photodiode-Array-0001>.
37. J. Hyvaerinen, *Measuring current voltage characteristic curve of solar panel - measuring response to varying electric load of solar panel with help of decaying light pulse such that falling tail of pulse is used for such short interval that intensity of pulse does not have time to change during measurement*, MIKROKEMIA OY (MIKR-Non-standard) MICROCHEMISTRY LTD (MICR-Non-standard) FORTUM POWER & HEAT OY (NESO) ENDEAS OY (ENDE-Non-standard). p. 797100-B1:.
38. R.A. Sinton and A. Cuevas, *A quasi-steady-state open-circuit voltage method for solar cell characterization*. in *Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2000. Glasgow, UK: James & James, London, UK, 2000: p. 1152-5.
39. T. Roth, J. Hohl-Ebinger, D. Grote, E. Schmich, W. Wara, S. Glunz, and R. Sinton, *Illumination-induced errors associated with Suns-Voc Measurements of Silicon Solar Cells*. Review of Scientific Instruments, 2009. **80**.
40. H. Kostkowski, *Reliable Spectroradiometry*. 1997: Spectroradiometry Consulting. 609.
41. L. Coslovi and F. Righini, *Fast Determination of the Nonlinearity of Photodetectors*. Applied Optics, 1980. **19**(18): p. 3200-3203.
42. Y. Zong, S.W. Brown, B.C. Johnson, K.R. Lykke, and Y. Ohno, *A Simple Spectral Stray light Correction Method for Array Spektroradiometers*. Applied Optics, 2006. **45**: p. 1111-1119.
43. A. Sperling, *Stray-light correction of array spectroradiometers using tunable pulsed and cw lasers*. in *NEWRAD 2005*. 2005. Davos.
44. IEC 60904-9 (Ed. 2), *Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator requirements*. 2007.
45. C. Droz, J. Roux, S.B. Rouelle, P. Valitutti, and P.R. Beljean, *Mastering the Spectrum in Class A Pulsed Solar Simulators*. in *23rd EUPVSEC*. 2008. Valencia, Spain: p. 326 - 329.
46. T. Mayer-Kuckuk, *Atomphysik. Eine Einführung*. 5th ed. 2007, Stuttgart: Teubner Verlag. 276.
47. W. Heering, *Plasmastrahlungsquellen Folien zur Vorlesung*. 2005/2006.
48. H. Vogel, *Gerthsen Physik*. Vol. 18. 1995: Springer.
49. R.D. Nasby, C.M. Garner, H.T. Weaver, F.W. Sexton, and J.L. Rodriguez, *Characterization of p+nn+ Silicon Concentrator Solar Cells*. in *15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1981. Kissimmee, Florida, USA: p. 132-137.
50. J. Hohl-Ebinger, *Untersuchung zur Messung der spektralen Empfindlichkeit von Solarzellen und -modulen*. 2004, Albert-Ludwigs Universität Freiburg.
51. A. Fallisch *Faculty of Electrical, Information and Media Engineering, Development, construction and test of a transimpedance amplifier for the calibration of solar cells and modules*. 2008, Bergische Universität Wuppertal Wuppertal. p. 98.
52. M. Meusel *Fakultät der Physik, Kalibrierung und Charakterisierung monolithischer Tandemsolarzellen aus III-V Halbleitern*. 2000, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und Fraunhofer ISE: Freiburg.

53. K. Heidler and J. Beier, *Uncertainty Analysis of PV Efficiency Measurements with a Solar Simulator: Spectral Mismatch, Non-Uniformity and other Sources of Error*. Proc. of 8th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1988. 1: p. 554-559.
54. ISO, *GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. 1995.
55. D.L. King and B.R. Hansen, *A Sensitivity Analysis of the Spectral Mismatch Correction Procedure Using Wavelength-Dependent Error Sources*. in *22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1991. Las Vegas, Nevada, USA: p. 459-465.
56. H. Field and K.A. Emery, *An Uncertainty Analysis of the Spectral Correction Factor*. in *Proc. of 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1993. Louisville, Kentucky, USA: p. 1180-1187.
57. S. Winter and A. Sperling, *Uncertainty analysis of a Photometer Calibration at the DSR Setup of the PTB*. in *2nd Expert Symposium on Measurement Uncertainty*. 2006. Braunschweig: p. 139-142.
58. D. Grote, M. Kasemann, M. Hermle, and W. Warta, *Analysing lateral inhomogeneities of silicon solar cells using a quasi 3d circuit simulation tool based on spice*. in *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2007. Milan, Italy: p. 305-9.
59. P.A. Basore and D.A. Clugston, *PCID version 4 for Windows: from analysis to design*. in *Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1996. Washington D C: p. 377-81.
60. K. Emery, J. Burdick, Y. Caiyem, D. Dunlavy, H. Field, B. Kroposki, T. Moriarty, L. Ottoson, S. Rummel, T. Strand, and M.W. Wanlass, *Temperature Dependence of Photovoltaic Cells, Modules, and Systems*. in *25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1996. Washington, DC, USA: p. 1275-1278.
61. IEC 60891 (Ed. 2), *Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*. 2009.
62. IEC 61853-1, *Photovoltaic (PV) Module Performance Testing and Energy Rating - Part 1: Irradiance and Temperature Performance Measurement and Power Rating*. 2011.
63. S. Winter, J. Metzdorf, K. Emery, F. Fabero, Y. Hishikawa, B. Hund, H. Mullejans, A. Sperling, and W. Warta, *The results of the second World Photovoltaic Scale recalibration*. in *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2005. Orlando, Florida, USA: p. 1011-4.
64. S. Winter and A. Sperling, *Long-term UV stability of reference solar cells*. in *Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2007. Milan, Italy: p. 2558-60.
65. C.R. Osterwald and e. al, *The World Photovoltaic Scale: An International Reference Cell Calibration Program*. Progress in PV, 1999. 7: p. 287-297.
66. M. Hörteis, J. Benick, J. Nekarda, A. Richter, R. Preu, and S.W. Glunz *Fundamental studies on the front contact formation resulting in a 21% efficiency silicon solar cell with printed rear and front contacts*. in *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2010. Honolulu, Hawaii, USA: p. in print.
67. Schott. *Filterkalkulationsprogramm*. 2010 [cited; Available from: http://www.schott.com/advanced_optics/german/filter/xls/SCHOTT-filter-glass_2010web.zip].

68. B. Hund, N. Ackermann, J. Hohl-Ebinger, M. Schädel, W. Warta, and S. Winter, *Possible Impact of Systematic Errors in IV-Measurement*. in *This Conference*. 2008.
69. J. Hohl-Ebinger and W. Warta, *Investigation of large area cell and module spectral response measurement*. in *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. 2004. Paris, France: p. 2611-4.
70. S. Winter, D. Friedrich, B. Ortel, A. Sperling, M. Hermle, J. Hohl-Ebinger, and W. Warta, *Non-Linearity of Solar Cells due to Non-Linear Effects within the Surrounding Area of the Active Cell*. in *23rd EUPVSEC*. 2008. Valencia, Spain: p. 1897-1899.
71. A. Krieg, A. Weil, E. Schäffer, J. Hohl-Ebinger, W. Warta, and S. Rein, *Accuracy of Inline IV-Measurements under Industrial Conditions*. in *22nd EUPVSEC*. 2007. Milan, Italy.
72. M. Glatthaar, A. Krieg, M. Greif, L. Greco, J. Hohl-Ebinger, F. Clement, S. Rein, W. Warta, and R. Preu, *Accurate IV-Measurement for Rear Contact Solar Cells*. in *25th EUPVSEC*. 2010. Valencia Spain.
73. J. Burdick and T. Glatfelter, *Spectral Response and I-V Measurements of Tandem Amorphous-Silicon Alloy Solar Cells*. *Solar Cells*, 1986. **18**: p. 301-314.
74. W. Knaupp, *Evaluation of PV module designs at irregular operation conditions*, in *Conference Record of the Twenty Sixth Ieee Photovoltaic Specialists Conference - 1997*. 1997, Ieee: New York. p. 1213-1216.
75. W. Kwapil, M. Kasemann, P. Gundel, M.C. Schubert, W. Warta, O. Breitenstein, J. Bauer, A. Lotnyk, J.-M. Wagner, P.C.P. Bronsveld, and G. Coletti, *Physical mechanisms of breakdown in multicrystalline silicon solar cells*. in *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2009. Hamburg, Germany: p. 896-900.
76. IEC 60904-3, *Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*. 1989.
77. C. Gueymard, *SMARTS, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment*. Professional Paper FSEC-PF-270-95, 1995.
78. S. Winter, D. Friedrich, and A. Sperling, *Effects of the new Standard IEC 60904-3:2008 on the Calibration Results of Common Solar Cell Types*. in *Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2010. Valencia, Spain: WIP-Munich.
79. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, *Solar Cell Efficiency Tables (Version 34)*. *Progress in Photovoltaics*, 2009. **17**(5): p. 320-326.

Danksagung

Ich möchte mich sehr herzlich bei den Menschen bedanken, die mir bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen haben. Mein besonderer Dank gilt

Herrn Prof. Dr. Gerhard Willeke für die Vergabe und Betreuung dieser Arbeit,

Herrn Prof. Dr. Leiderer für die Übernahme des Zweitreferats,

Herrn Dr. Wilhelm Warta für die Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit, und die Freiheit zur Eigeninitiative,

Herrn Dr. Stefan Glunz für die herzliche Atmosphäre im gesamten Bereich und das stets offene Ohr,

Herrn Dr. Martin Hermle für viele Diskussionen über Halbleiter, über die Technologie und die Eigenschaften von Referenzsolarzellen,

Dem gesamten Team CallLab PV Cells (Thomas Hultsch, Mathias Klenner, Katinka Kordelos, Sarah Meisenheimer, Matthias Neidhard, Simone Petermann, Holger Seifert, Astrid Semeraro, Jan Weiß, Jutta Zielonka) für ihren ungewöhnlichen Einsatz und die angenehme Zusammenarbeit,

Britta Hund für die gute Zusammenarbeit am ISE und darüber hinaus,

Den III-V-Kalibrierern Dr. Carsten Baur, Tobias Gandy, Michael Schachtner und Dr. Gerald Siefer, für die gute Zusammenarbeit,

Armin Bösch für die Unterstützung durch Kleben und Bonden,

Den Technischen Diensten für ihre ausgezeichnete Unterstützung,

Den Vielen aus allen Abteilungen, mit denen ich Kontakt hatte, und hier nicht einzeln erwähnt wurden, für die stete Bereitschaft zur Hilfe und Diskussionen,

Meiner Familie: Sandra, Jonas, Hannes und Linus, die manchmal auch etwas Geduld aufbringen mussten.

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Weitere Personen, insbesondere Promotionsberater, waren an der inhaltlich materiellen Erstellung dieser Arbeit nicht beteiligt. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Freiburg im Breisgau, August 2011