



Wolfgang Wille, bakk. tech.

Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften von monokristallinen Solarzellen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Telematik

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Graz, November 2016

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Söser
Institut für Elektronik

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit war es einzelne Prozessschritte einer industriellen Produktionslinie zu untersuchen und zu verbessern. Ein Aufbau und die Inbetriebnahme eines offline Solarsimulators mit kontinuierlicher Lichtquelle, dessen Integration in einen vorhandenen Produktionszyklus, als auch seine Zuverlässigkeit als Kalibrationsinstrument für inline Zelltester wurde eingehend mittels einer Messmittelfähigkeitsstudie untersucht und diskutiert. Weiters wurde die Vorderseitenmetallisierung und ihre Eigenschaften bezüglich Linien- und Kontaktwiderständen in Abhängigkeit von Liniendimensionen, sowie von verschiedenen Emitterschichtwiderständen, firing conditions und Testmustern evaluiert. Diese Ergebnisse führten in Folge zu einem verbesserten Testmuster, als auch zu einem verbessertem Vorderseitenlayout für unterschiedliche Emitterschichtwiderstände und Metallisierungsdimensionen. Dadurch konnte eine Zelleffizienzsteigerung aufgrund von höheren Kurzschlussströmen und Leerlaufspannungen erreicht werden.

Abstract

The aim of this work is to investigate and improve certain process steps of a solar cell production line. It is shown how a continuous light solarsimulator and its peripheral components were integrated into the production cycle and how an MSA (measurement system analysis) is used to test its reliability as a calibration tool for inline cell testers. Furthermore the front side metallization was evaluated in terms of line- and contact resistance depending on emitter sheet resistance, firing conditions and test patterns. These results yielded to a new improved test pattern and in addition to an optimized front side metallization grid for different line width and emitter sheet resistances, which achieved nameable improvements in short circuit current, open circuit voltage and therefore in cell efficiency.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	6
1.1	Aufgaben	6
1.1.1	Standardcharakterisierung von Solarzellen	6
1.1.2	Charakterisierung der Zellbestandteile	6
2	Einleitung	7
3	Grundlagen des Lichts und der Solarzelle	9
3.1	Eigenschaften des Sonnenlichts, <i>Air Mass</i>	9
3.2	Wirkungsweise einer Solarzelle	10
3.2.1	Ersatzschaltbild einer Solarzelle	12
3.3	Herstellung eines Solarmoduls, Wertschöpfungskette	13
3.3.1	Vom Roh- zum Reinstsilizium	14
3.3.2	Vom Ingot zum Wafer	14
3.3.3	Vom Wafer zur Zelle	15
3.3.4	Von der Zelle zum Modul	16
3.3.5	Vom Modul zum System	16
4	Offline Solarsimulator (Solsim)	17
4.1	Definition der Klasseneinteilung von Solarsimulatoren	17
4.2	Definition <i>Standard Test Conditions</i>	18
4.3	Aufbau eines Solarsimulators	18
4.4	Kalibrierung des Solarsimulators	22
4.4.1	Einflussfaktoren auf die Kalibrierung	23
4.5	Charakterisierung einer Solarzelle mittels Solarsimulator	25
4.5.1	Parameterextraktion im beleuchteten Zustand:	26
4.5.2	Parameterextraktion im dunklen Zustand	28
4.5.3	Parameterextraktion aus Hell- und Dunkelcharakteristik	32
4.6	Bestimmung der Temperaturkoeffizienten	33
4.6.1	Temperaturkoeffizient Kurzschlussstrom $TK_{I_{sc}}$	33
4.6.2	Temperaturkoeffizient Leerlaufspannung $TK_{V_{oc}}$	35
4.6.3	Temperaturkoeffizient Füllfaktor TK_{FF}	37
4.6.4	Temperaturkoeffizient Maximum Power Point $TK_{P_{mpp}}$	37
4.6.5	Temperaturkoeffizient Wirkungsgrad TK_{η}	38
4.7	Vergleich Offline- zu Inline-Charakterisierung	39
5	Messmittelanalyse eines Offline Solarsimulators	43
5.1	Einleitung	43
5.2	Verfahren zur Bestimmung des Fähigkeitsnachweises	43
5.2.1	Auflösung eines Messsystems	44

5.2.2	Verfahren 1	44
5.2.3	Verfahren 2	45
5.2.4	Stabilitätsuntersuchung	46
5.3	Ergebnis	46
5.3.1	Verfahren 1	46
5.3.2	Verfahren 2	47
5.3.3	Stabilitätsuntersuchung	47
6	Kontaktwiderstand und Schottky Barrieren	50
6.1	Einleitung	50
6.2	Metal-Halbleiterkontakte	50
6.3	Kontaktwiderstand und Einfluss der effektiven Kontaktfläche	53
6.4	Messtechnische Bestimmung des Kontaktwiderstandes	54
6.4.1	Two-Contact Two-Terminal Method	55
6.4.2	Multiple-Contact Two-Terminal Method	57
6.5	Multiple-Contact Four-Terminal Method	63
6.6	Praktische Evaluation der Teststruktur	65
6.6.1	Linienwiderstandsmessungen	65
6.6.2	Kontaktwiderstandsmessungen	66
6.6.3	Neuentwurf der TLM Struktur	67
7	Optimierung des Vorderseitenlayouts	72
7.1	Leistungsverlust im Emitter	74
7.2	Elektrischer Leistungsverlust in den Fingern	76
7.3	Elektrischer Leistungsverlust in den Busbars	76
7.4	Abschattungsverluste der Metallisierung	77
7.5	Leistungsverlust der Metallisierung	77
7.6	Ergebnis Vorderseitenoptimierung	78
8	Ergebnisse und Ausblick	81
9	Anhang	85
9.1	Messmittelanalyse nach Verfahren 1	85
9.2	Messmittelanalyse nach Verfahren 2	94

1 Aufgabenstellung

Die Diplomarbeit hat den Aufbau und die Inbetriebnahme eines Offline Solarmessplatzes zum Inhalt (nach Norm IEC 60904-x). Der Offline-Messplatz muss für alle relevanten Parameter die nach der Norm festgelegte Übereinstimmung mit den Messwerten der beiden Inline-Messsysteme liefern. Die für den Versuchsaufbau notwendigen Komponenten wurden von der Fa. Blue Chip Energy angeschafft. Es sind dies:

- 1 AAA-Solarsimulator SOL3A der Firma Newport
- 1 Parametric Analyzer der Fa. Midl-Bauer Technology
- 1 Temperaturregelter Chuck (-10 bis 130C) der Fa. Midl-Bauer Technology

In einem zweiten Arbeitspaket sollen alle relevanten Komponenten der produzierten Solarzellen genauer untersucht werden. Ziel dieser Untersuchungen ist die den Wirkungsgrad der Solarzellen limitierenden Faktoren ausfindig zu machen und die Erarbeitung von Strategien, wie der Wirkungsgrad weiter verbessert werden kann.

1.1 Aufgaben

1.1.1 Standardcharakterisierung von Solarzellen

Die Bestimmung der für die Parameterextrahierung von Zellwirkungsgrad η , Füllfaktor FF , Kurzschlussstrom I_{sc} , Kurzschlussstromdichte J_{sc} , Leerlaufspannung V_{oc} , Leistung, Spannung und Strom im Punkt maximaler Leistung P_{mpp} , V_{mpp} und I_{mpp} , und aller relevanten parasitären Widerstände (R_{ser} , L_f , D_f , R_{shunt} , D_f , ...) verwendeten Algorithmen beim Inline-System. Davon ausgehend sollen die Algorithmen in die Software des Midl-Bauer Parameter Analyzers implementiert, eine Kalibrierstrategie für den Messplatz erarbeitet und seine Eignung auf Produktionstauglichkeit untersucht werden. Die Messroutinen sollten eine weitestgehend automatische Parameterextrahierung ermöglichen.

1.1.2 Charakterisierung der Zellbestandteile

Der Solarsimulator soll auf seine Eignung zur Charakterisierung von pn-Übergang und Vorderseitenmetallisierung untersucht werden. Die Aufnahme von Dunkel- und Hellkennlinien über einen breiten Temperaturbereich, die Bestimmung der Temperaturkoeffizienten an Zellen, sowie von Kontakt- und Linienwiderständen der Vorderseiten-Metallisierung und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Transfer-Length-Method (TLM) Messstrukturen soll evaluiert werden.

2 Einleitung

Plancks Theorie von 1901, dass elektromagnetische Strahlung in diskreten Energiequanten mit einer Energie $E = hf$, wobei f die Frequenz und h das Plancksche Wirkungsquantum darstellt, vorliegt, wurde von Albert Einstein 1905 dahingehend erweitert, dass [1]

... die Energie des Lichtes kontinuierlich über den durchstrahlten Raum verteilt sei, findet bei dem Versuch, die lichtelektrischen Erscheinungen zu erklären, besonders große Schwierigkeiten. [...] Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen ... besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können. [...] Monochromatische Strahlung ... verhält sich ... so, wie wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten von der Größe hf bestünde. [...] In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Energiequanten ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie der Elektronen. Die einfachste Vorstellung ist die, daß ein Lichtquant seine ganze Energie an ein einziges Elektron abgibt.

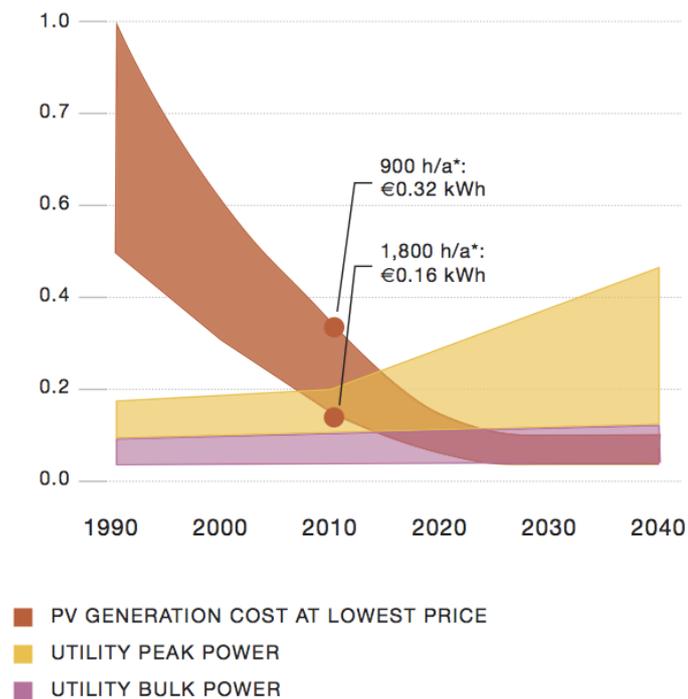
Die Tatsache, dass Materie im allgemeinen und ein pn -Übergang im speziellen Licht absorbieren und dadurch Ladungsträger erzeugen kann, wird als **photovoltaischer Effekt** bezeichnet. Seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts wird dieser Effekt industriell ausgenutzt. Erst außerhalb der Atmosphäre, später dann auch terrestrisch.

Durch Entwicklungen in der Halbleiterindustrie stieg der Energieumwandlungskoeffizient, durch die Möglichkeiten der großindustriellen Fertigung von Solarzellen sanken die Produktionskosten soweit, dass die Netzparität weltweit in den nächsten Jahren erreicht werden soll. Abbildung 1 zeigt die historische Entwicklung, als auch eine Abschätzung für die nächsten Jahrzehnte. Laut [3] waren Ende 2009 weltweit 23GW an PV Leistung installiert, Ende 2010 sollen es mehr als 35GW sein.

Wie [2] ausführlich untersucht hat, beläuft sich die *EPBT* (*Energy Payback Time*) eines monokristallinen PV-System bei 32 Monaten. Für multikristallines Substrat ergibt sich ein Zeitraum von 26 Monaten, Si-Ribbon bei 20 Monaten und CdTe - Dünnschichtzellen bei 13 Monaten. Die EPBT ist die Zeit nachdem die gesamte Energie, die für die Produktion des PV Produkts notwendig gewesen ist (von der Herstellung des Rohsiliziums bis zum fertigen Modul), wieder rückgewonnen werden konnte. Aufgrund dieser Tatsache ist es sinnvoll fossile Energieträger wie Kohle,

UTILITY PRICES AND PV GENERATION COSTS

€/KWh



*h/a: Hours of sun per annum. 900 h/a corresponds to northern countries of Europe. 1,800 h/a corresponds to southern countries of Europe.

Abbildung 1: Kostenvergleich der Herstellungskosten von PV Energie und dem Stompreis für Endverbraucher [3]

Erdgas oder Erdöl für die Herstellung von Systemen zur Gewinnung von Energie aus nachhaltigen Energieträgern wie die der Sonnenenergie zu nutzen.

3 Grundlagen des Lichts und der Solarzelle

3.1 Eigenschaften des Sonnenlichts, *Air Mass*

In guter Näherung kann die spektrale Strahlungsintensität der Sonne mit der spektralen Strahlungsintensität eines schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von 5800 K angenähert werden. Abbildung 2 zeigt den theoretischen spektralen Verlauf eines schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von 5800 K und im Vergleich, das von der *WMO* (*World Metrological Organisation*) gemessene Spektrum außerhalb der Erdatmosphäre.

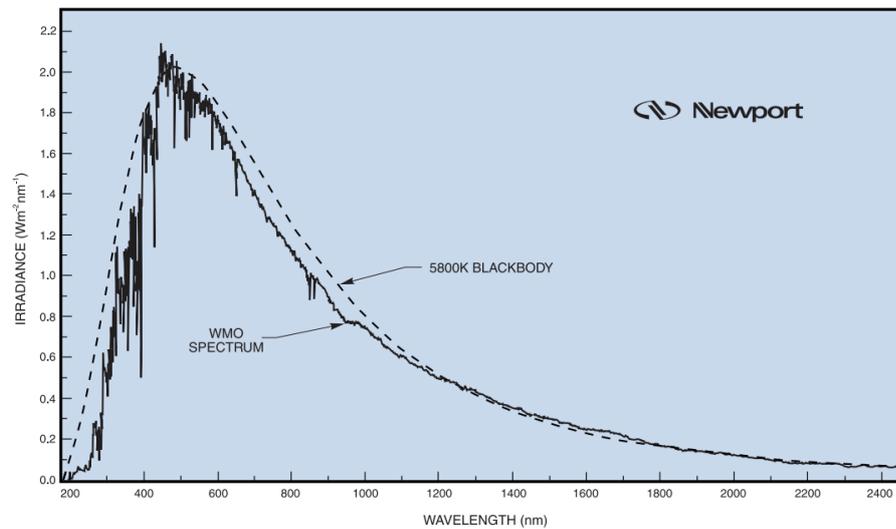


Abbildung 2: Theoretischer spektraler Verlauf eines schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von 5800 K und im Vergleich, das von der *WMO* gemessene Spektrum ausserhalb der Erdatmosphäre[11]

In Abhängigkeit des Sonnenstandes erfährt der von der Sonne kommende Strahlungsfluss die geringste Abschwächung durch Absorption und Streuung, wenn die Sonne im Zenit steht. Für den Fall das die Sonne sehr flach am Horizont steht, werden die Strahlen einen längeren Weg durch die Atmosphäre nehmen und dadurch auch mehr gedämpft (Abbildung 3).

Die Weglänge durch die Atmosphäre lässt sich über $1/\cos(\phi)$ abschätzen, wobei ϕ der Winkel zwischen Sonne und der Position direkt Überkopf ist. Dies wird üblicherweise als *Air Mass* AM bezeichnet und folgt folgendem Zusammenhang

$$AM = 1/\cos(\phi) \quad (1)$$

Steht die Sonne im Zenit gilt $\phi = 0^\circ$ und $AM = 1$, für $\phi = 48,2^\circ$ gilt $AM = 1,5$. Außerhalb der Atmosphäre gilt unabhängig von ϕ immer $AM = 0$.

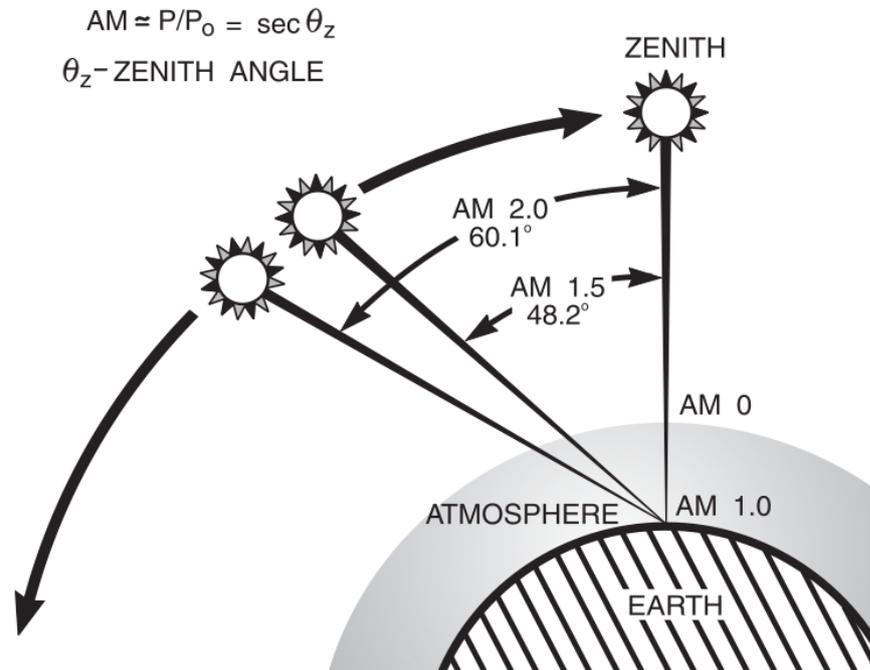


Abbildung 3: AirMass in Abhängigkeit vom Sonnenstand [11]

Die Dämpfungseigenschaften der Atmosphäre hängen hauptsächlich von der wellenlängenabhängigen *Rayleigh*-Streuung, der nicht wellenlängenabhängigen Streuung an Aerosolen und Staubpartikeln (*Mie*-Streuung) und den Absorptionseigenschaften von Gasen in der Atmosphäre (Ozon, Wasserdampf, Sauerstoff und Kohlendioxid; siehe die lokalen Minima in Abbildung 4) ab.

Im Allgemeinen setzt sich die globale Strahlung aus einem direkten und einem diffusen Anteil zusammen. Da der diffuse Anteil aufgrund der *Rayleigh*-Streuung in Bereichen hoher Strahlungsintensität sehr groß ist, spielt dieser Anteil für photovoltaische Energiegewinnung eine wichtige Rolle. Bei bewölktem Wetter liegt der diffuse Strahlungsanteil bei fast 100 %, bei klarem Wetter immer noch bei ≈ 20 % [13]. Die spektrale Verteilung für rein direkte Bestrahlung und Globalstrahlung ist in Abbildung 4 dargestellt.

3.2 Wirkungsweise einer Solarzelle

Lichtquanten (Photonen) mit genügend hoher Energie können Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband anregen. Photonen deren Energie kleiner als die der Bandlücke ist, werden mit den e^- nicht in Wechselwirkung treten und einfach durch die Materie transmittieren. Photonen mit Energie größer als der Bandlückenenergie können das e^- auf ein über der Leitungsbandkante liegendes Energieniveau heben.

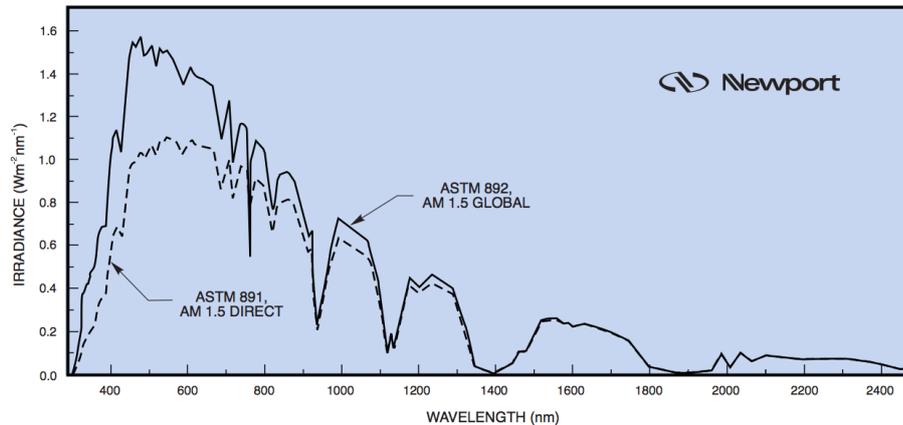


Abbildung 4: AM1.5D (direkter Strahlungsfluss) und AM1.5G (Globalstrahlung) [11]

Innerhalb kürzester Zeit wird das e^- allerdings auf das Energieniveau der Leitungsbandkante fallen und die überschüssige Energie in Form von Wärme an das Kristallgitter abgeben. In Abhängigkeit vom beleuchteten Material kann man deshalb eine Absorptionskonstante α bestimmen, die für einige Halbleiter in Abbildung 5 gegenübergestellt ist. Den Kehrwert des Absorptionskoeffizienten α^{-1} bezeichnet man als Eindringtiefe. Man erkennt, dass Galliumarsenid (GaAs) wie auch amorphes Silizium (a-Si) Photonen mit einer Energie von > 1.5 eV bei einer Eindringtiefe von ca. $2 \mu\text{m}$ absorbieren. Monokristallines Silizium dagegen könnte bei der gleiche Dicke nur Photonen mit einer Energie von > 2 eV absorbieren. Darin liegt auch der Grund, dass monokristalline Solarzellen meist eine Dicke von $200 \mu\text{m}$ aufweisen, da sie dann auch Photonen mit kleinerer Energie absorbieren können.

Der Absorptionskoeffizient alleine beschreibt zwar die Generationsrate eines Ladungsträgerpaares, nur ohne geeignete Trennung des Elektronen-Loch-Paares würden diese wieder rekombinieren und die überschüssige Energie in Form von Wärme abgeben. Deshalb wird über einen pn -Übergang eine Raumladungszone erzeugt, die die Trennung dieser Überschussladungsträger zur Aufgabe hat. Ein Photon mit geringer Energie erzeugt tief in der Basis ein Elektron-Loch Paar. Für ein p -dotiertes Substrat ist das Loch ein Majoritätsträger, das e^- ein Minoritätsträger. Das erzeugte Elektron diffundiert in Abhängigkeit seiner Diffusionslänge solange durch die Basis bis es rekombiniert oder den Rand der Raumladungszone erreicht. Am Rand der Raumladungszone wird es durch das elektrische Feld in den Emitter befördert. Das gleiche Prinzip gilt für Löcher, wenn die Generation innerhalb des Emitters stattgefunden hat. Eine Absorption innerhalb der Raumladungszone führt zu sofortiger Trennung der Ladungsträger.

Diese Trennung führt zu einem Ungleichgewicht zwischen den verschiedenen Ladungsträgern zwischen Emitter und Basis, wodurch sich eine Potentialdifferenz aus-

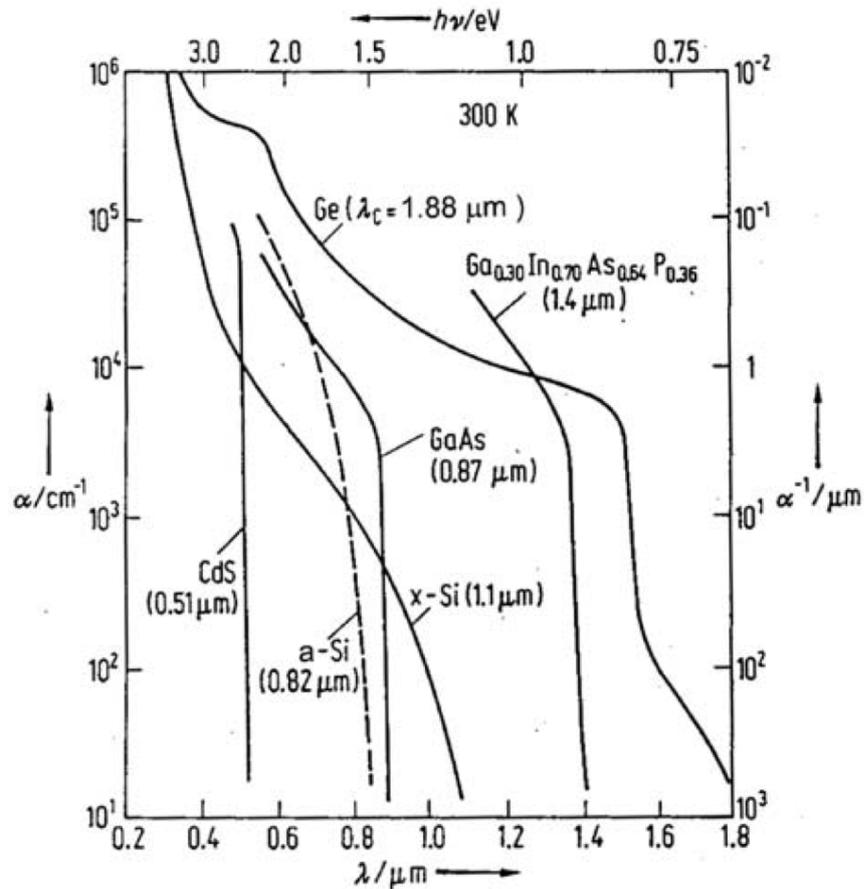


Abbildung 5: Absorptionskoeffizient α , Eindringtiefe α^{-1} in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für verschiedene Halbleitermaterialien[4]

bildet. Solange einfallende Photonen weiterhin Ladungsträgerpaare erzeugen, werden diese auch weiterhin durch die Raumladungszone getrennt und die e^- über die externe Last zurück in die Basis fließen.

3.2.1 Ersatzschaltbild einer Solarzelle

Das **Eindiodenmodell** einer Solarzelle modelliert eine reale Solarzelle mit den durch den Herstellungsprozess auferlegten Grenzen ohne dabei auf etwaige Rekombination in der Raumladungszone Rücksicht zu nehmen. Das Ersatzschaltbild (Abbildung 6) beinhaltet eine Stromquelle, welche den generierten Photostrom I_L beschreibt, eine zur Stromquelle parallel geschaltete, ideale Diode, die sich für die Diodencharakteristik verantwortlich zeigt, und zusätzlich noch einen Serien- (R_{ser}) und Parallelwiderstand (R_{shunt}), mit denen die Nichtidealität der Zelle modelliert wird.

Der Serienwiderstand setzt sich aus dem Widerstand im Halbleiter, den Kontakt-

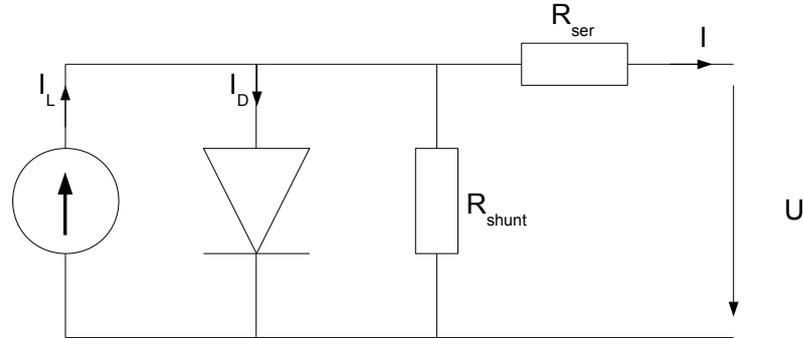


Abbildung 6: Ersatzschaltbild einer Solarzelle nach dem 1-Diodenmodell

widerstand von Halbleitermaterial in die Metallisierung und den Metallisierungswiderständen selbst zusammen.

Der Parallelwiderstand ist ein Maß für Leckströme durch oder um den Emitter herum. Kristalldefekte innerhalb des pn -Übergangs, unzureichende Kantenisolierung oder etwaiges spatiales Durchfeuern des Emitters sind Hauptursachen von verringerten Shuntwiderständen.

Nach der Knotenregel gilt für den Strom I folgende rekursive Funktion

$$\begin{aligned}
 I &= I_L - I_D - \frac{U_{R_{shunt}}}{R_{shunt}} \\
 &= I_L - I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{k_B T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_{ser}}{R_{shunt}} \\
 &= I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(U+IR_{ser})}{k_B T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_{ser}}{R_{shunt}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Das **Zweidiodenmodell** ist eine Erweiterung des Eindiode Modells das der Rekombination in der Raumladungszone durch eine zweite Diode Rechnung trägt. Der Idealitätsfaktor für diese zweite Diode wird im Gegensatz zur ersten Diode nicht mit 1, sondern idealerweise mit 2 angenommen. Daraus ergibt sich, ähnlich der Gleichung 2 für den Strom I

$$I = I_L - I_{01} \left(e^{\frac{q(U+IR_{ser})}{n_1 k_B T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{q(U+IR_{ser})}{n_2 k_B T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_{ser}}{R_{shunt}} \quad (3)$$

3.3 Herstellung eines Solarmoduls, Wertschöpfungskette

Die Wertschöpfungskette für ein vollständiges PV-System aus kristallinem Silizium ist in Abbildung 8 dargestellt.

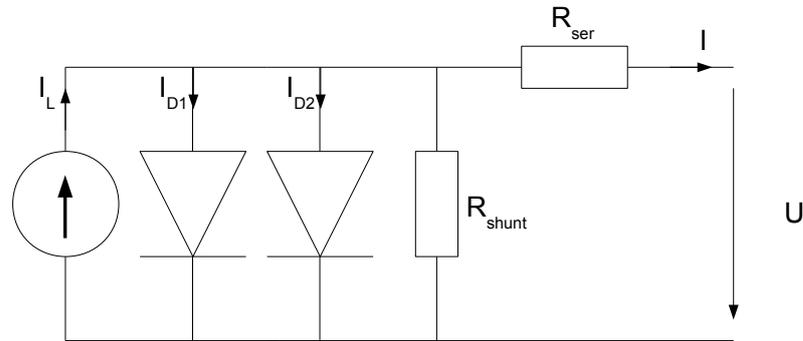


Abbildung 7: Ersatzschaltbild einer Solarzelle nach dem 2-Diodenmodell

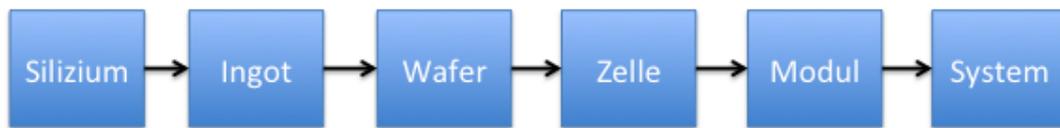


Abbildung 8: Wertschöpfungskette für ein Solarmodul mit Zellen aus kristallinem Silizium

3.3.1 Vom Roh- zum Reinstsilizium

Als erster Schritt werden Quarzsand und Kohlenstoff über einen Lichtbogen erwärmt bis flüssiges Silizium abgeführt werden kann. Der Reinheitsgrad der dadurch gewonnenen Schmelze ist aber noch nicht ausreichend für *SGS* (*solar grade silicium*) oder *EGS* (*electronic grade silicium*) weshalb eine nachfolgende Refraktionierung notwendig ist um Polysilizium mit hoher Reinheit ($\geq 99.99\%$) zu erzeugen [5]. Das meist verwendete Verfahren dazu ist das *Siemens-Verfahren*, welches über das Zwischenprodukt Trichlorsilan und anschließender mehrstufiger Destillation ausreichend reines Polysilizium liefert.

3.3.2 Vom Ingot zum Wafer

Durch Einschmelzen des Reinstsiliziums und nachfolgendes Aushärten werden mono- oder polykristalline Ingots bzw. Blöcke erzeugt. Polykristalline Blöcke werden durch kontrolliertes Abkühlen, monokristalline Ingots über das *Czochralski-Verfahren* (in seltenen Fällen auch über das teurere *Float Zone-Verfahren*) hergestellt. Mittels Draht- oder Diamantsägen erfolgt die Vereinzelung der Blöcke bzw. Ingots zu ca. $200\ \mu\text{m}$ dicken Wafern [6]. Durch nasschemische Nachbehandlung werden die Waferscheiben von Sägerückständen gesäubert.

3.3.3 Vom Wafer zur Zelle

Als erster Prozessschritt auf dem Weg zur fertigen Solarzelle werden die Waferoberflächen nasschemisch texturiert. Dabei entsteht eine Pyramidenstruktur mit einigen μm Höhe. Damit kann man aufgrund des Brechungsindex von Silizium bei guter Texturierung die Oberflächenreflexion (Reflexionsgrad R) im Bereich von 400 - 1100 nm von $R \approx 30\%$ auf $R \approx 12\%$ reduzieren. Direkt auf die texturierte Oberfläche wird dann die großflächige Dotierung für die Ausbildung des Emitters vorgenommen. Neben dem zumeist verwendeten POCl_3 -CVD Verfahren finden auch inline-Dotierverfahren bestehend aus einer Dotierstoff-Abscheidung aus einem Aerosol und nachfolgendem Diffusionsschritt im Durchlaufofen Verwendung. Das zweite Verfahren zeichnet sich besonders durch hohen Durchsatz und geringe Kosten für den Betrieb der Anlage aus. Zwischen den beiden unterschiedlich dotierten Schichten wird sich darauffolgend eine Raumladungszone ausbilden, deren Ausdehnung abhängig von der Dotierkonzentration im Emitter (typischerweise $N_D > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) und der Basisdotierung ($N_A \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) ist. Ein weiterer nasschemischer oder lasergestützter Prozessschritt ist die Kantenisolierung, die den vorderseitigen Emitter von der rückseitigen Basis isoliert. Dies ist notwendig, da sich sowohl beim POCl_3 - als auch bei dem Inline-Doping Konzept ein n -dotierter Bereich über die Waferkante, also um die Raumladungszone herum ausbildet und diese so kurzschließt. Um die Lichteinkopplung der Vorderseite nochmalig zu optimieren wird eine Antireflexschicht (engl. *anti reflective coating ARC*) CVD gestützt aufgebracht. Dies führt zu einer Vorderseitenreflexion von $R \approx 2\text{-}3\%$ im Bereich von 400 bis 1100 nm. Industrieller Standard um die Metallisierung aufzubringen sind siebdruckende Verfahren. Dabei wird Aluminium großflächig auf der Rückseite aufgedruckt, wodurch sich durch einen Temperaturschritt das sogenannte *BSF (Back Surface Field)* ausbildet. Dies führt zu einem pp^+ Übergang der als Reflektor für die Minoritätsträger wirkt. Die mit Aluminium beschichtete Rückseite wird nur durch zwei oder mehrere Busbars (u.U. auch *Bus-Pads* bei modernen Zellen) aus Silber unterbrochen, die notwendig sind um die Zellen ausreichend gut in den Modulen miteinander zu verlöten. Auf der Vorderseite sind neben den Busbars auch noch eine Art Kammstruktur aus feinen Linien aus Silber, den sogenannten Fingern. Der nachfolgende kritische *Firing*-Schritt hat die Aufgabe die Kontaktbildung auf der Vorder- wie auch der Rückseite zu gewährleisten. Ein Querschnitt durch eine fertige Solarzelle ist in Abbildung 9 zu sehen. Ein durch ein Photon entstandenes Elektronen-Loch-Paar wird durch die Raumladungszone getrennt, wodurch die Minoritätsträger zu Majoritätsträgern werden und ihre Rekombinationswahrscheinlichkeit um ein Vielfaches sinkt. Über den schon erwähnten Rückseitenkontakt und den Fingern auf der Vorderseite kann der generierte Photostrom abgegriffen werden.

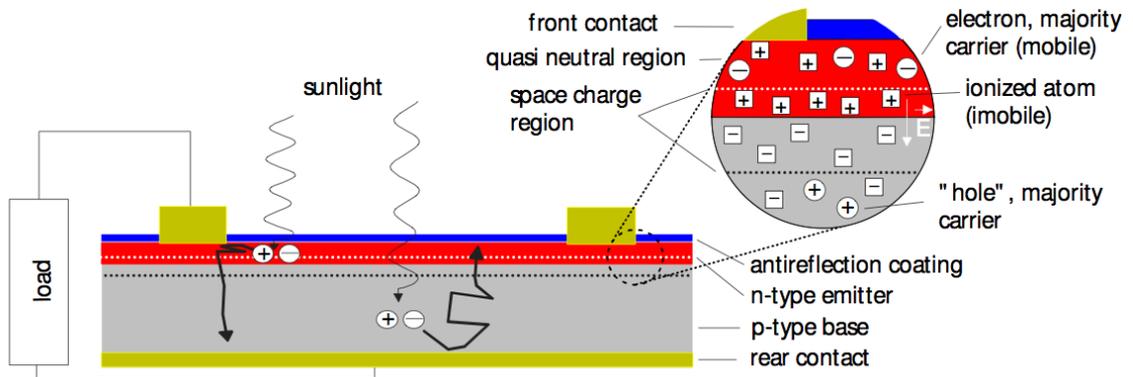


Abbildung 9: Querschnitt durch eine industrielle Solarzelle [12]

3.3.4 Von der Zelle zum Modul

Um vernünftige Spannungen eines Moduls zu erreichen, werden in den meisten Fällen bis zu 72 Solarzellen in Serie verschaltet. Dies erfolgt durch Verlöten der Zellen mit Lötbandchen in sogenannten *Stringern*, die immer eine Zellenrückseite mit der nächsten Zellenvorderseite verbinden. Aus sicherheitstechnischer Sicht werden im Modul noch sogenannte *Bypass-Dioden* verschaltet, um die Zellen und das Modul bei teilweiser Abschattung nicht zu beschädigen. Die verstringten Zellen werden anschließend in einem Kunststoff einlaminiert, vorderseitig mit einer Glasscheibe versehen und danach meist in einem Profilrahmen verbaut.

3.3.5 Vom Modul zum System

Das Verschalten von mehreren Modulen und die anschließende Nutzung des produzierten Stroms im Insel- oder Einspeisungsbetrieb schliesst die Kette ab.

4 Offline Solarsimulator (Solsim)

Unter *Solarsimulator* versteht man eine Messanordnung, die entweder natürliches oder simuliertes Sonnenlicht ausnutzt, um die Strom-Spannungskennlinien einer Solarzelle oder eines Solarmoduls aufzunehmen. Im industriellen Sinne kann man noch zwischen *Offline* oder *Inline* unterscheiden, wobei ersteres der Charakterisierung der Zelle innerhalb eines Produktionszyklus einer Zelle beschreibt. Das letztgenannte System bezeichnet eine vom Prozessfluss entkoppelte Messung.

Ein *offline* Solarsimulator hat nicht nur die Aufgabe Zellen zu charakterisieren um gewisse prozessrelevanten Parameter zu extrahieren, die wiederum dazu genutzt werden können die Prozessstabilität zu steigern oder Weiterentwicklungen voranzutreiben, sondern auch um etwaige *Downtimes* des *Inline* Charakterisierungssystems so gering wie möglich zu halten. Eine Verringerung der *Downtimes* des *Inline*-Systems gelingt durch Auslagerung der Tochterzellherstellung aus zertifizierten Referenzzellen auf das *Offline*-System und die damit einhergehende Verkürzung der Kalibrierungszeit des *Inline*-Systems.

4.1 Definition der Klasseneinteilung von Solarsimulatoren

Die Normreihe IEC60904 beschreibt die erforderlichen Anforderungen im Detail. Es gilt sowohl den spektralen Verlauf der Lichtintensität, die Stabilität der Lichtintensität über die Zeit, als auch die Homogenität des eingestrahnten Lichts über die gesamte Oberfläche des *Device Under Test (DUT)* innerhalb gewisser Grenzen zu halten. Der Standard (IEC60904-9) unterteilt diese Kriterien jeweils in die Klassen A, B und C (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Definition der Solarsimulatorklassen A, B und C

Classification	Spectral Match 400 nm - 1100 nm	Non-Uniformity of Irradiance	Temporal Instability of Irradiance	
			Short Term STI	Long Term LTI
A	0,75 - 1,25	2 %	0,5 %	2 %
B	0,6 - 1,4	5 %	2 %	5 %
C	0,4 - 2	10 %	10 %	10 %

Da der gesamte spektrale Verlauf von 400 nm bis 1100 nm den obigen Kriterien entsprechen muss, wird dieser Bereich nochmalig in 6 Untergruppen aufgeteilt, wobei jede dieser Untergruppen den spektralen Anforderungen für die gewünschte Klasse (A, B oder C) entsprechen muss. Unter STI versteht man die Stabilität der

eingestrahltten Lichtintensität von einem Messpunkt zum nächsten, LTI beschreibt die Stabilität von einer U/I - Kurve zur nächsten.

4.2 Definition *Standard Test Conditions*

Um die Messergebnisse einer Solarzelle vergleich- und interpretierbar zu machen, einigte man sich in [8] auf definierte Messbedingungen. Für terrestrische Anwendungen gelten die *STC* (*Standard Test Conditions*):

- **Spektrum AM1.5**
Verschiedene Solarzellen haben unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten, sodass ohne definiertes Spektrum kein geeigneter Vergleich möglich wäre.
- **Lichtintensität von 1000 W/m²**
Da der Wirkungsgrad einer Solarzelle direkt proportional mit der eingestrahltten Lichtintensität zusammenhängt (über die Leerlaufspannung), muss eine definierte Bestrahlungsstärke verwendet werden.
- **Temperatur des DUT von 25 °C**
Sowohl Kurzschlußstrom, wie auch Leerlaufspannung sind temperaturabhängig was eine konstante DUT-Temperatur erforderlich macht.
- **einfallendes Licht muss lambertsch sein**
Mindestens 85 % des einfallenden Lichts muss senkrecht zum DUT stehen, um die natürliche Richtungsverteilung des Strahlgangs der Sonne zu simulieren.

Die *STC* sind nicht mit den *SOC* (*Standard Operation Conditions*) zu verwechseln, welche meist von Modulherstellern verwendet werden. Die *SOC* beschreibt das Verhalten des Moduls bei 0,8 kW/m² Bestrahlungsstärke, 20 °C Umgebungstemperatur und einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 1m/s.

4.3 Aufbau eines Solarsimulators

Ein Solarsimulator besteht im einfachsten Fall aus einer Lichtquelle, einem Spektralfilter, einer Linse und einer elektrischen Messanordnung um die Strom-/Spannungskennlinie des DUT aufzunehmen. Die Lichtquelle erzeugt eine in ihrer Intensität zeitlich stabile Strahlung, welche durch den spektralen Filter auf das gewünschte Spektrum (z.B. AM1.5G) gefiltert wird. Die nachfolgende Linse stellt sicher, dass die Strahlung homogen auf das DUT auftrifft. In Abbildung 10 ist eine Detailansicht des verwendeten Simulators von der Firma Newport zu sehen.

Als Lichtquelle dient eine 1600W Xenon Lichtbogenlampe, die im Brennpunkt eines Hohlspiegels beweglich angeordnet ist. Die Lampe emittiert ein Spektrum, welches in etwa dem eines Schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von 5800 K

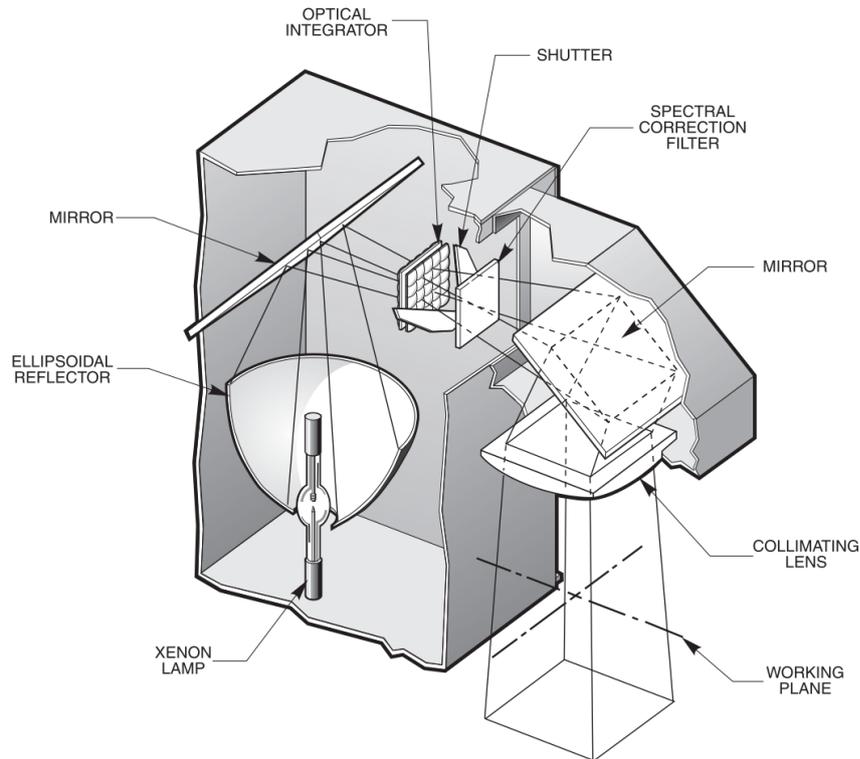


Abbildung 10: Detailansicht des verwendeten Simulator von der Firma Newport [11]

entspricht. Über einen Umlenkspiegel wird das Licht durch den Spektralfilter geführt und über eine Linse auf die Arbeitsfläche im definierten Abstand gelenkt, wo sich auch das DUT befindet.

Die zu vermessende Solarzelle befindet sich auf einem mit Gold beschichteten Vakuum-*Chuck* (Abbildung 11) welcher sich für die ganzflächige Rückseitenkontaktierung und die Temperaturstabilisierung des DUT verantwortlich zeigt. Der Chuck selbst hat mehrere Temperatursensoren (PT100) integriert, wie auch eine Wasserkühlung /-heizung mit der ein Temperaturbereich von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgedeckt werden kann. Abbildung 12 zeigt ein Blockschaltbild der *Thermo Chuck Control Unit*. Die Vorderseitenkontaktierung erfolgt über Kontaktstiftleisten mit 12 Kontaktstiftpaaren, die äquidistant angeordnet sind. Die Messung der Strom-Spannungscharakteristika erfolgt über eine softwaregesteuerte *Source Measure Unit (SMU)* der Firma MB Technologies. Eine Blockdarstellung der SMU zeigt Abbildung 13. Die gesamte Messanordnung wurde zusätzlich noch in ein nichtreflektierendes Gehäuse eingebaut, um sowohl Dunkel- als auch Hellcharakteristik ohne Einfluß von Umgebungslicht messen zu können. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Ab- und Zuluft innerhalb des Gehäuses gelegt um konstante Zustände bezüglich des Wärmehaushalts während der Messung gewährleisten zu können.

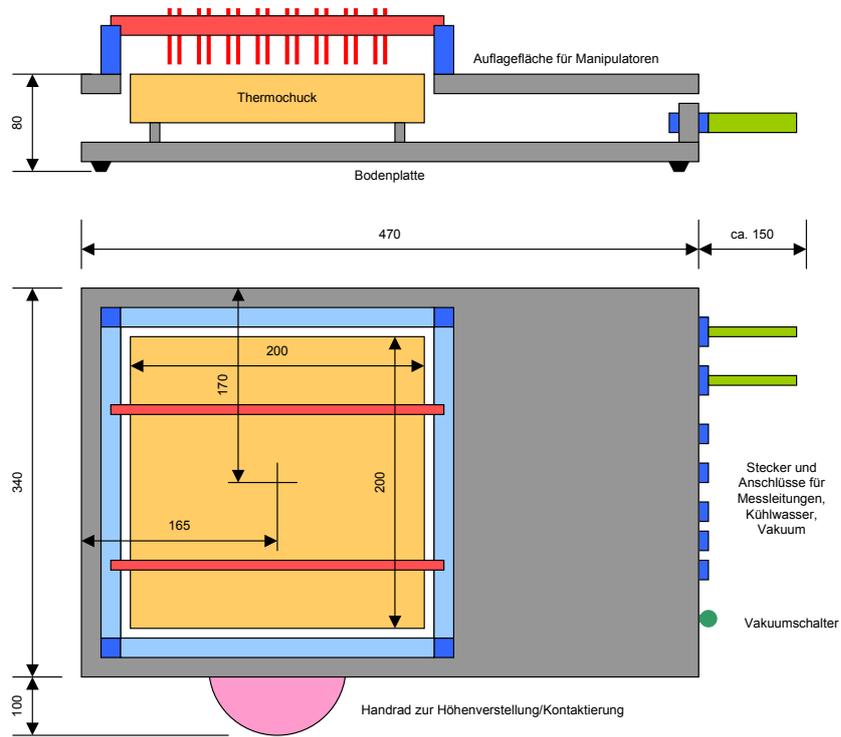


Abbildung 11: Detailansicht des verwendeten Thermochucks

Der große Vorteil eines stationären Systems mit kontinuierlicher Bestrahlung liegt darin, dass für die Messung selbst genügend Zeit zur Verfügung steht und dadurch sehr hochaufgelöst gemessen werden kann. Zusätzlich spielen durch den stationären Zustand kapazitive Effekte keine Rolle.

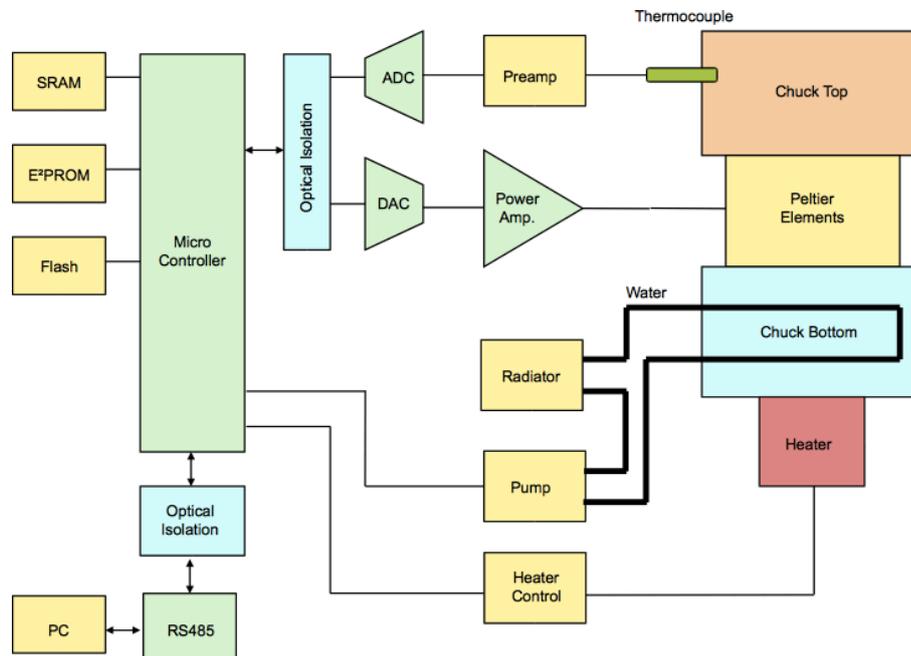


Abbildung 12: Blockdiagramm der *Thermo Chuck Control Unit* von der Firma MB Technologies

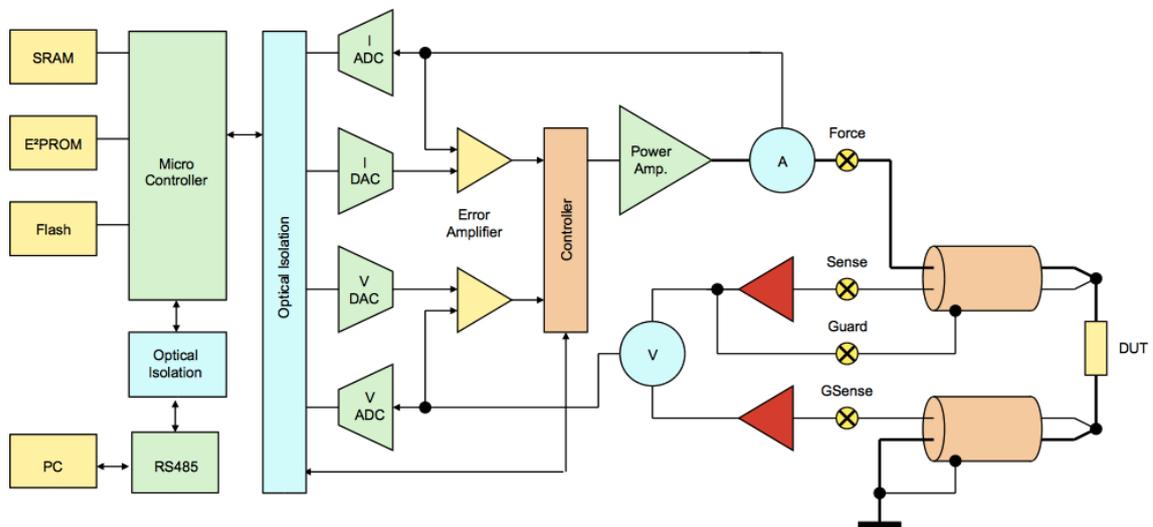


Abbildung 13: Blockdiagramm der verwendeten SMU von der Firma MB Technologies

4.4 Kalibrierung des Solarsimulators

Eine Solarzelle kann durch Angabe von drei Ausgangsparametern (Kurzschlussstrom I_{SC} , Leerlaufspannung V_{OC} und Füllfaktor FF) ausreichend beschrieben werden (siehe Abbildung 15).

Der Kurzschlussstrom I_{sc} wird idealerweise durch den durch das eingestrahelte Licht generierten Strom I_L beschrieben und ist abhängig von der Strahlungsleistung und der spektralen Zusammensetzung.

Die Leerlaufspannung V_{OC} bekommt man, wenn man die ideale Diodengleichung

$$I = I_0(e^{qV/k_B T} - 1) - I_L$$

betrachtet und $I = 0$ setzt.

$$V_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (4)$$

Man sieht die Abhängigkeit der Leerlaufspannung vom Sättigungssperrestrom I_0 und der Temperatur T .

Der Füllfaktor als dritter Parameter beschreibt wieviel Fläche das Rechteck $I_{mpp} \cdot U_{mpp}$ im Vergleich zum Rechteck $I_{SC} \cdot V_{OC}$ einnimmt.

$$FF = \frac{I_{mpp} U_{mpp}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (5)$$

Um den Solarsimulator zu kalibrieren, muss also sichergestellt werden, dass Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und Füllfaktor einer gewissen Zelle ordnungsgemäß reproduziert werden können [9].

Hierzu wird eine von einem Kalibrationsinstitut vermessene Referenzzelle (*golden cell*) verwendet. Da der Kurzschlussstrom ein direktes Maß für das mit definiertem Spektrum einfallende Licht ist, kann entweder die Steuerleistung der Lichtquelle oder die Position der Lichtquelle innerhalb des Hohlspiegels solange angepasst werden bis der gewünschte Strom an der zuvor vom Kalibrierinstitut vermessenen Zelle erreicht wird. Laut Herstellerangaben hat beides keinen Einfluss auf die Homogenität des einfallenden Lichtes. Die Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Temperatur kann ausgenutzt werden um die Zelle auf die Temperatur zu bringen, bis die Leerlaufspannung der Referenzzelle reproduziert wird. Der Füllfaktor selbst ist (für die Messung) ein Maß für die Güte der Kontaktierung von Thermochuck und Kontaktstiftleisten auf die Zelle und kann ohne Auswirkung auf Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung anders nicht beeinflusst werden. Konnten alle drei Parameter der Referenzzelle reproduziert werden, gilt der Solarsimulator als kalibriert. Eine detaillierte Abhandlung ist unter [10] zu finden.

4.4.1 Einflussfaktoren auf die Kalibrierung

Mögliche Einflussfaktoren auf die Kalibrierung können hauptsächlich auf unzufriedenstellende Kontaktierung zurückgeführt werden. Einerseits spielt die Rückseitenrauhigkeit des als Passivierung und für das *back surface field* genutzten Aluminiums eine entscheidende Rolle bezüglich Rückseitenkontaktierung im elektrischen Sinne, allerdings auch im Bezug auf den Wärme(ab)transport von der Zelle auf den Thermochuck. Dies zeigt sich dann vor allem in einer Abweichung von der Solltemperatur von 25 °C des DUT und damit in verfälschten Leerlaufspannungen. Die Vorderseitenkontaktierung, die über *Pogo-Pins* realisiert wurde, ist relativ unkritisch bezogen auf Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung, allerdings zeigt die Anzahl der Strom- und Spannungspins einen Einfluss auf den Füllfaktor. Eine Messung der gleichen Zelle mit 8 und dann mit 14 Kontaktstiftpaaren zeigt im Mittel einen Unterschied von 0.2 % absolut.

Einen weiteren Einflussfaktor stellt das Ein- und Ausschalten der Lampe dar. Die thermische Belastung auf die mechanische Lampenfassung lässt die Lampe nach jedem Ein- und Ausschaltzyklus leicht aus dem Fokus des Hohlspiegel wandern, was eine veränderte Lichtleistung am DUT zur Folge hat. Zusätzlichen Einfluss auf die Lampenleistung zeigte auch noch die Betriebsdauer der Xenon-Bogenlichtlampe, deren Lichtleistung mit Anzahl der Betriebsstunden abnimmt. Laut Herstellerangaben muss dabei allerdings nur die Steuerleistung angepasst werden, auf die spektrale Zusammensetzung des Lichts hat dies keinen Einfluss. Verdeutlicht wurde dies in Abbildung 14. Eine messtechnische Überprüfung konnte dafür nicht durchgeführt werden.

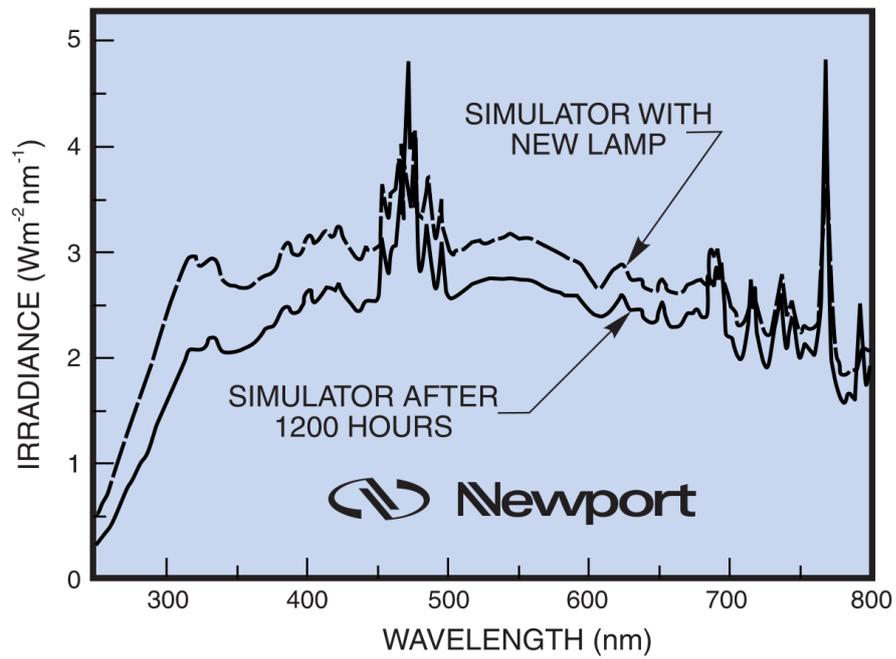


Abbildung 14: Einfluss der Lampenleistung und deren spektrale Zusammensetzung bei unterschiedlichen Betriebsstunden der Xenon-Bogenlichtquelle der Firma Newport [11]

4.5 Charakterisierung einer Solarzelle mittels Solarsimulator

Eine Solarzelle muss, um sie vollständig elektrisch zu charakterisieren, sowohl im beleuchteten, als auch im unbeleuchteten Zustand untersucht werden. Für den beleuchteten Fall arbeitet die Solarzelle als Stromquelle und durch Variation der Last von sehr klein (Kurzschlussbedingung) bis sehr groß (Leerlaufbedingung) können die Strom-/Spannungswerte gemessen werden. Man bekommt somit die sogenannte Hellkennlinie einer Zelle. Im unbeleuchteten Fall verhält sich die Zelle wie eine Diode. Durch Variation der angelegten Spannung kann der Strom im Durchgangsbereich bestimmt werden.

Die Anordnung des Solarsimulators bestimmt für jeden Messpunkt Strom, Spannung und die Temperatur des DUT. Aus der Kennlinie lassen sich dann charakteristische Werte einer Solarzelle ablesen / berechnen. Eine typische Hellcharakteristik ist in Abbildung 15, eine Dunkelcharakteristik in Abbildung 16 abgebildet.

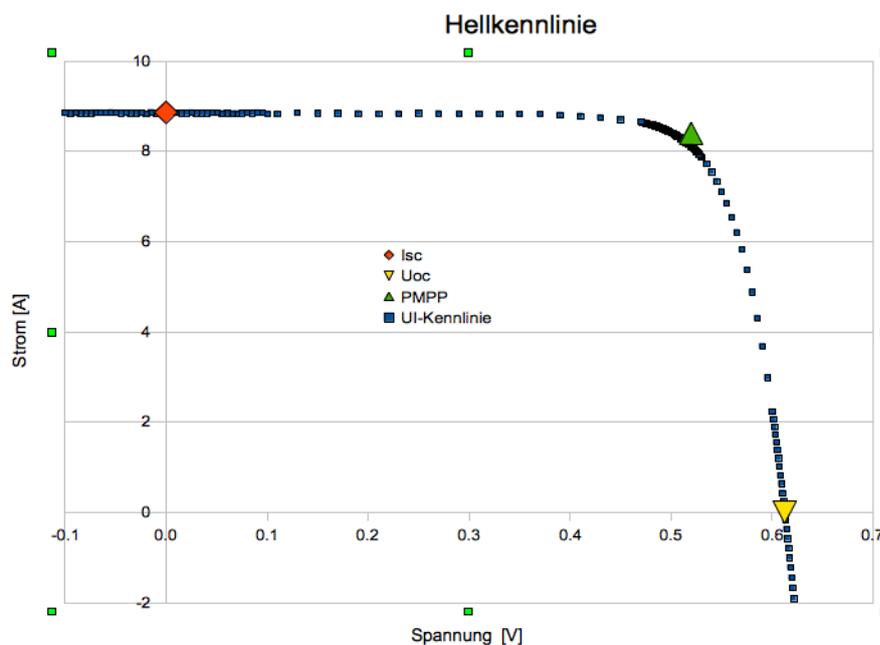


Abbildung 15: Hellcharakteristik einer typischen Solarzelle

Prinzipiell nutzt man bei der Bestimmung der parasitären Widerstände den Kurzschluss- und Leerlaufwert aus, da bei ersterem (genügend großer Shuntwiderstand vorausgesetzt) die Kennlinie um den Shuntwiderstand, und bei zweiterem die Kennlinie um den seriellen Widerstand bereinigt erscheint.

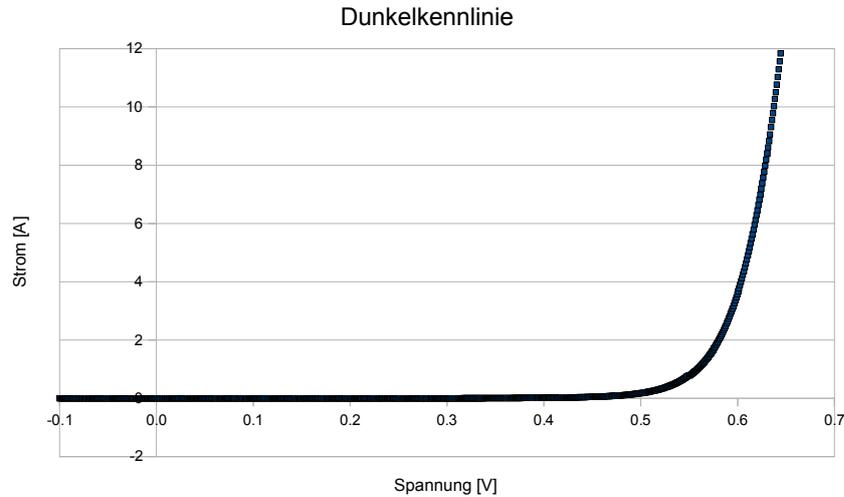


Abbildung 16: Dunkelcharakteristik einer typischen Solarzelle

4.5.1 Parameterextraktion im beleuchteten Zustand:

- **Kurzschlussstrom I_{SC} , Shuntwiderstand Light forward $R_{shunt_{L_f}}$**
 Um den Kurzschlussstrom zu bestimmen, wird eine Gerade um den Spannungsnulldurchgang gefittet und dann der Schnittpunkt mit der Ordinate bestimmt. Da die Messung von knapp 9 A mit einer Auflösung von 0.1 % (was ca. 10 mA entspricht) eine gewisse Herausforderung darstellt, gilt es eine Vielzahl von Messpunkten nahe des Spannungsnulldurchgangs vorzusehen. Die Steigung dieser gefitteten Geraden wird als *Shuntwiderstand Light forward $R_{shunt_{L_f}}$* bezeichnet. Durch die flache Kennlinie in diesem Bereich ist das Ergebnis dieses Parameters allerdings nicht sehr aussagekräftig (Abbildung 17).
- **Leerlaufspannung V_{OC} , serieller Widerstand Light forward $R_{ser_{L_f}}$**
 Die Bestimmung der Leerlaufspannung erfolgt im Schnittpunkt einer gefitteten Gerade der Messpunkte nahe des Stromnulldurchgangs und der Abszisse. Durch die hohe Auflösung der SMU in kleinen Strombereichen lässt sich - genügend Messpunkte vorausgesetzt - die Leerlaufspannung sehr genau bestimmen. Die Steigung der gefitteten Geraden wird als *serieller Widerstand Light forward $R_{ser_{L_f}}$* bezeichnet.
- **Maximum Power Point MPP , Strom I_{mpp} und Spannung U_{mpp} im MPP**
 Multipliziert man die Strom- und Spannungsmesswerte eines Messpunkts und trägt dies über der Spannung auf, erhält man eine Kurve wie in Abbildung 19. Fittet man die Messwerte mit einem Polynom zweiter Ordnung, erhält man

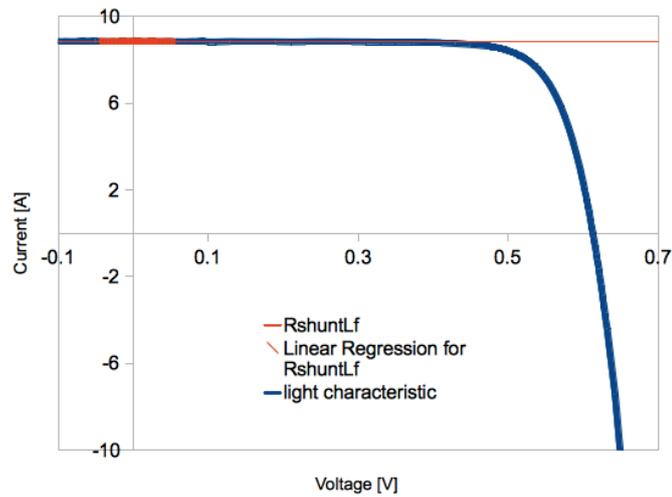


Abbildung 17: Bestimmung des Kurzschlussstromes I_{sc} und des Shuntwiderstand Light forward $R_{shuntLf}$

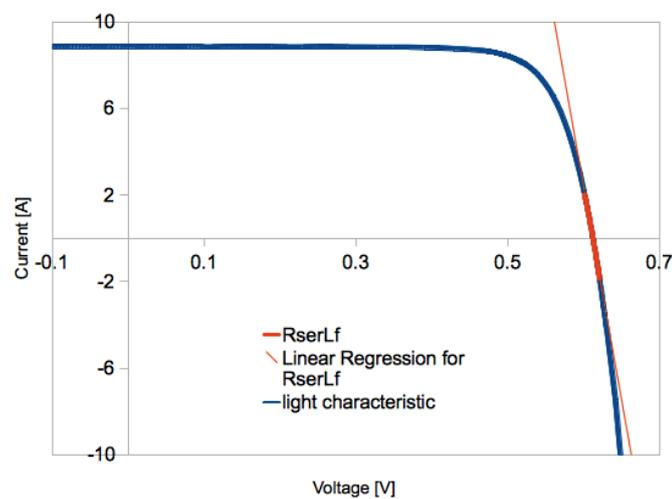


Abbildung 18: Bestimmung der Leerlaufspannung V_{oc} und des seriellen Widerstands Light forward R_{serLf}

einem Punkt maximaler Leistung (P_{mpp}), der wiederum durch einen Strom- und Spannungswert (I_{mpp} und U_{mpp}) repräsentiert wird.

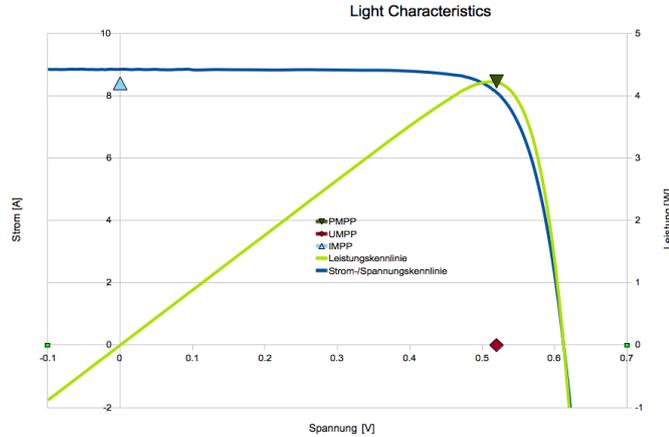


Abbildung 19: Bestimmung des P_{mpp} aus der Leistungskennlinie

- **Füllfaktor FF , Wirkungsgrad η**

Der Füllfaktor ist definiert durch

$$FF = \frac{I_{mpp}U_{mpp}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (6)$$

und lässt sich durch die davor extrahierten Werte berechnen. Der Wirkungsgrad einer Solarzelle, ist definiert durch:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{P_{mpp}}{P_{in}} \\ &= \frac{I_{mpp}U_{mpp}}{P_{in}} \\ &= \frac{I_{SC}V_{OC}FF}{P_{in}} \end{aligned}$$

Die eingestrahlte Leistung P_{in} auf eine Zelle entspricht der Lichtintensität multipliziert mit der Zellfläche A . Im Falle einer 156 mm pseudosquare Solarzelle entspricht das: $P_{in} \approx 239cm^2 * 1000W/m^2$.

4.5.2 Parameterextraktion im dunklen Zustand

- **Shuntwiderstand Dark Forward $R_{shunt_{Df}}$ und Shuntwiderstand Dark Reverse $R_{shunt_{Dr}}$**

Beide Parameter werden über die Steigung einer gefitteten Gerade um den Spannungsnulldurchgang bestimmt. $R_{shunt_{Df}}$ im Durchlassbereich (*forward*), $R_{shunt_{Dr}}$ im Sperrbereich (*reverse*). Im Gegensatz zum $R_{shunt_{Lf}}$ können aufgrund der guten Auflösung der SMU bei kleinen Strömen diese beiden Parameter sehr zuverlässig bestimmt werden. Deshalb wird in der Praxis zusätzlich noch der

- **Shuntwiderstand Dark Forward Dark Reverse $R_{shunt_{DfDr}}$** bestimmt. Dieser wird aus

$$R_{shunt_{DfDr}} = MIN(R_{shunt_{Df}}, R_{shunt_{Dr}}) \quad (7)$$

berechnet und zeichnet sich als relevanter Prozessparameter aus.

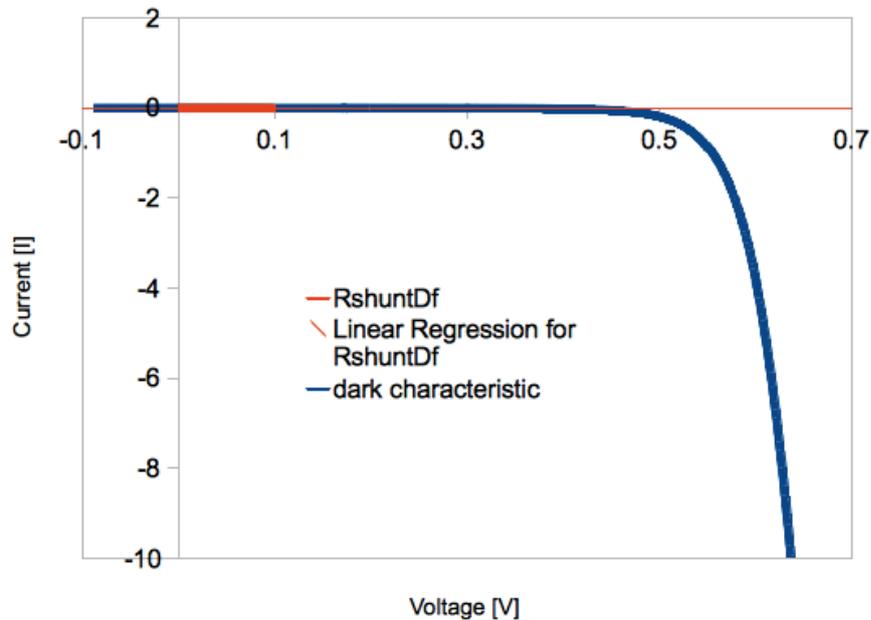


Abbildung 20: Bestimmung des Shuntwiderstands $R_{shunt_{Df}}$

- **serieller Widerstand Dark Forward $R_{ser_{Df}}$**

Die reziproke Steigung der Kennlinie im Durchlassbereich bei großen Strömen bestimmt diesen Parameter.

Die auf den ersten Blick wenig aussagekräftige Dunkelkennlinie einer Solarzelle, lässt sich durch eine halblogarithmischer Skalierung des Stroms für weitere Parameterextraktion nutzen. Wie in Abbildung 23 gezeigt, lassen sich ausgehend aus dem 2-Dioden-Modell einer Solarzelle zusätzlich noch die Sättigungssperrströme I_{01} und I_{02} , als auch die beiden Idealitätsfaktoren n_1 und n_2 extrahieren.

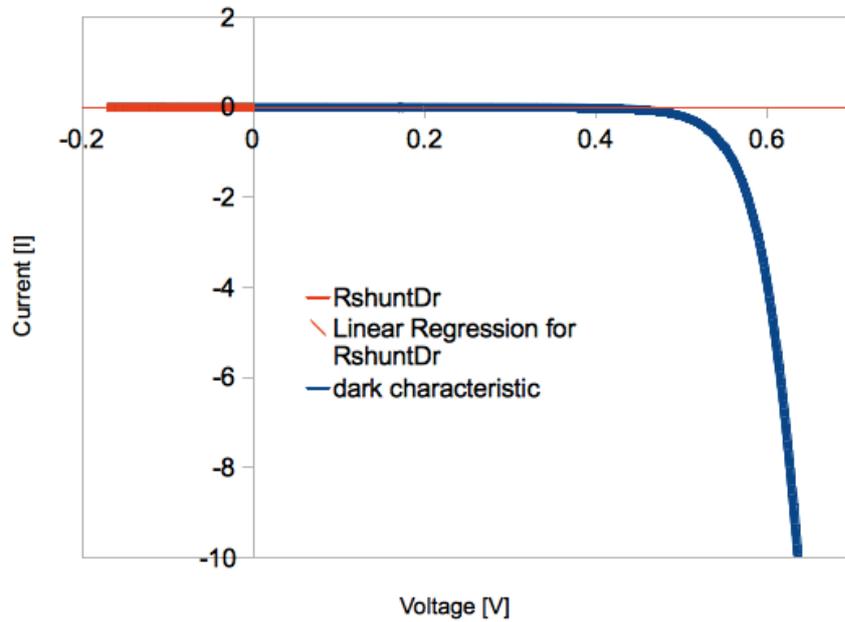


Abbildung 21: Bestimmung des Shuntwiderstands $R_{shuntDr}$

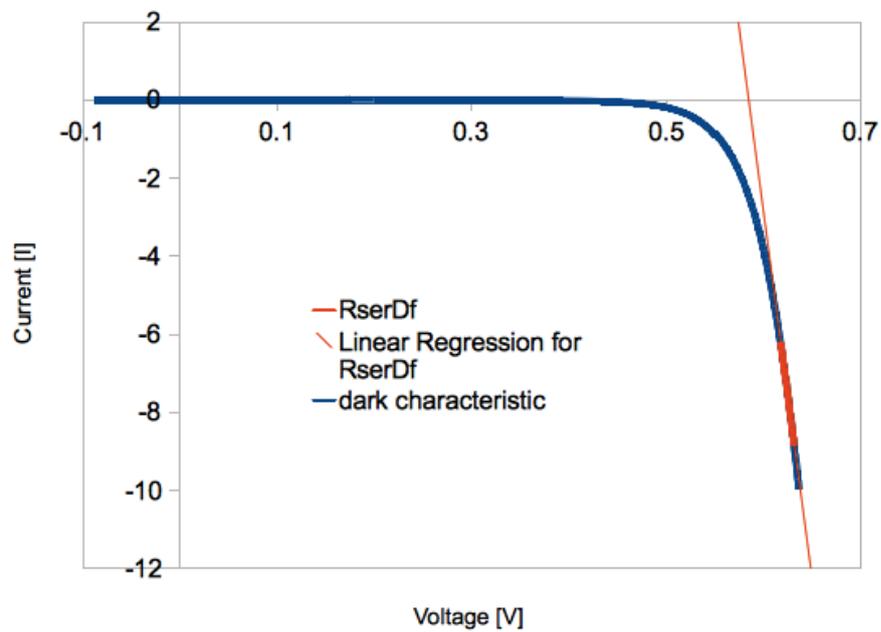


Abbildung 22: Bestimmung des seriellen Widerstands R_{serDf}

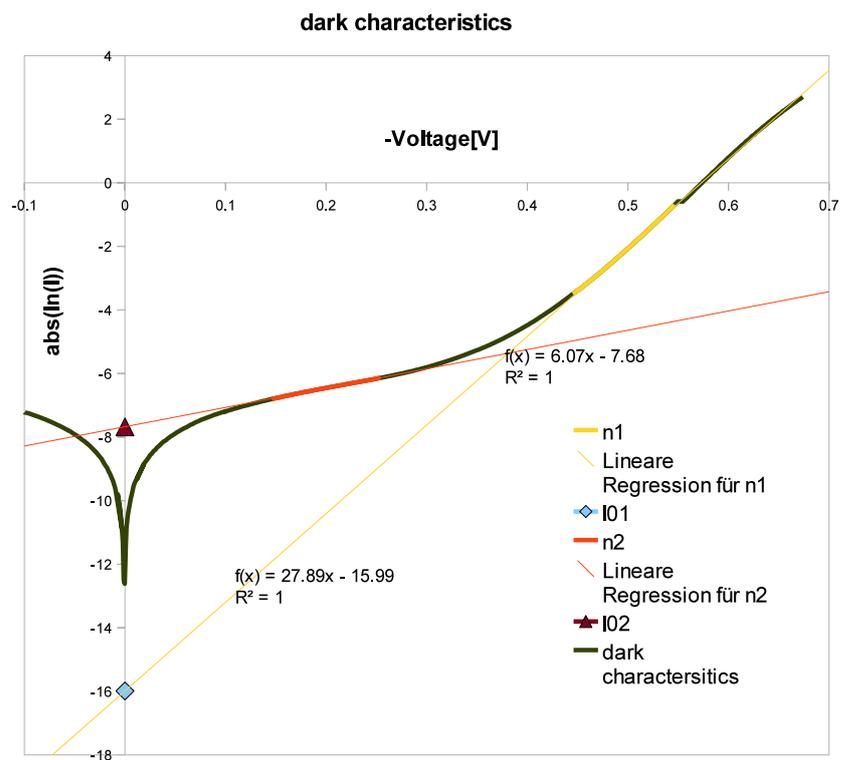


Abbildung 23: Dunkelcharakteristik einer typischen Solarzelle in halblogarithmischer Darstellung

4.5.3 Parameterextraktion aus Hell- und Dunkelcharakteristik

Die Tatsache, dass im beleuchteten Zustand bei Leerlaufbedingung kein Strom durch den seriellen, parasitären Widerstand R_{ser} fließt, kann dazu benutzt werden um mittels Vergleichsmessung mit der Dunkelkennlinie den seriellen Widerstand zu bestimmen. Dafür wird die Spannungsdifferenz aus Leerlaufspannung und des durch einen Strom mit der Größe des Kurzschlussstroms hervorgerufenen Spannungsabfalls im unbeleuchteten Zustand bestimmt und durch den Kurzschlussstrom dividiert.

$$R_{serLfdF} = \frac{U_{dark-Isc} - U_{oc}}{I_{sc}} \quad (8)$$

Ein weiteres, ähnliches Verfahren wurde von [14] vorgestellt und von [16] verfeinert, welches den Spannungsunterschied im Maximum Power Point als Berechnungsgrundlage heranzieht. Beide Verfahren vernachlässigen den Einfluss der unterschiedlichen Stromrichtung zwischen Hell- und Dunkelcharakteristik und damit der unterschiedlichen Verteilung des Stroms in Kontaktnähe. Da allerdings für eine vollständige Charakterisierung einer Zelle sowohl Dunkel- als auch Hellkennlinie aufgenommen werden müssen, kann in industrieller Umgebung dieser Parameter leicht und schnell bestimmt werden.

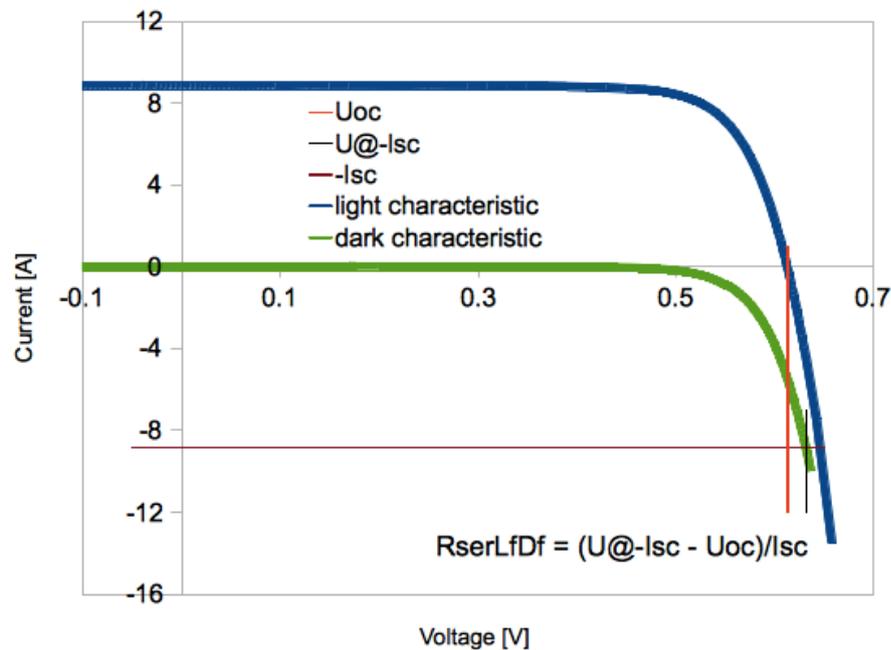


Abbildung 24: Bestimmung des seriellen Widerstands Light forward - Dark forward $R_{serLfdF}$

4.6 Bestimmung der Temperaturkoeffizienten

Im vorangegangenen Kapitel wurden diverse Parameter einer Solarzelle aus der UI-Kennlinie bei Standardbedingungen (STC) extrahiert. Um die Temperaturabhängigkeit dieser Parameter einer Zelle zu evaluieren, wurden sowohl Hell- als auch Dunkelkennlinien bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen und die Ergebnisse miteinander verglichen. Da sich die Solarzelle unter Sonneneinstrahlung erwärmt, kommen diesen Koeffizienten in der Praxis große Bedeutung zu. Eine Darstellung der gesamten Hell- wie auch Dunkelkennlinie bei 5 verschiedenen Zelltemperaturen zeigen Abbildung 25 und 26.

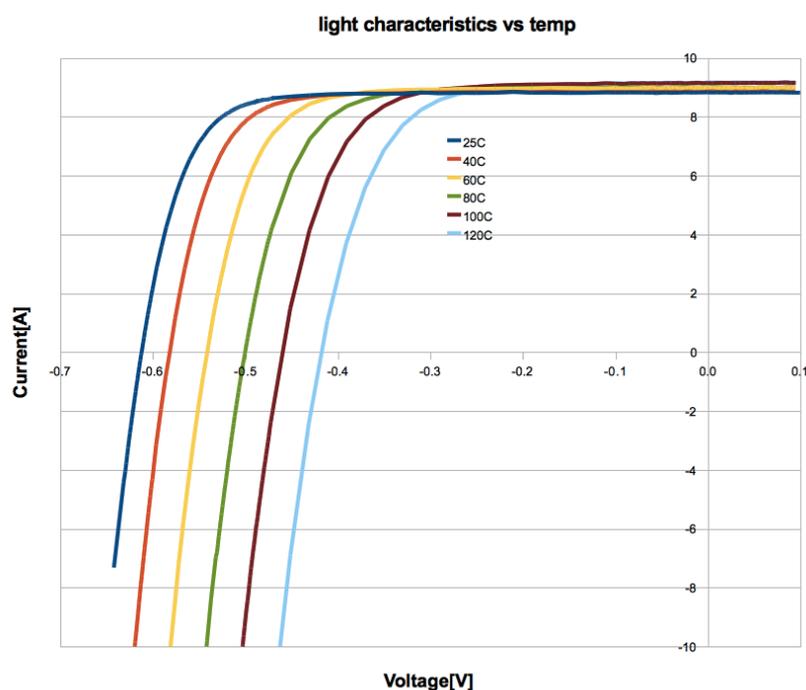


Abbildung 25: Hellcharakteristik einer Solarzelle bei Temperaturen von 25 bis 120 °C

4.6.1 Temperaturkoeffizient Kurzschlussstrom $TK_{I_{sc}}$

Der Kurzschlussstrom zeigt nur eine geringe Temperaturabhängigkeit. Mit steigender Temperatur T nimmt die Lichtabsorption zu, da der *band gap* mit steigender Temperatur leicht abnimmt und dadurch auch Photonen mit geringerer Energie ein Elektronen-Loch-Paar erzeugen können. Eine Darstellung der Abhängigkeit ist in Abbildung 27 ersichtlich. Aufgetragen wurden jeweils der Mittelwert der einzelnen

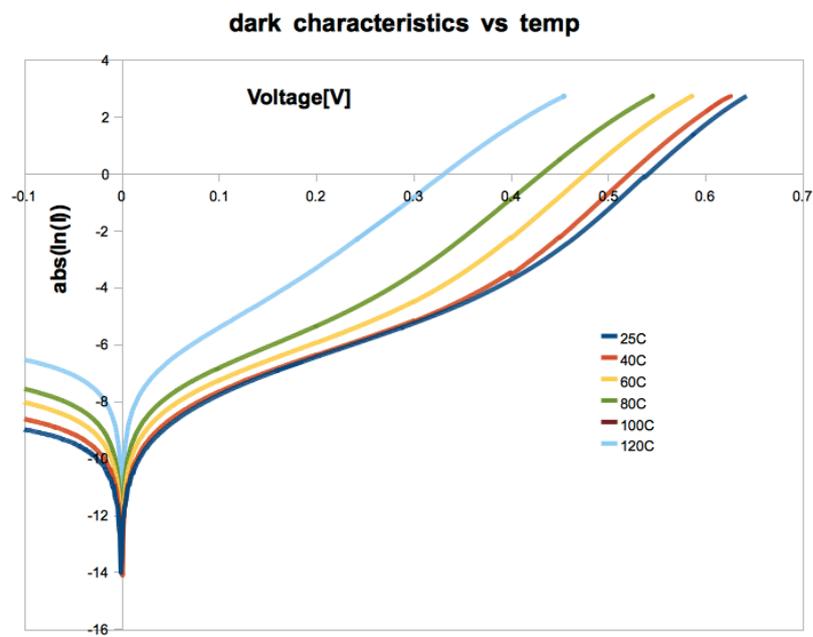


Abbildung 26: Dunkelcharakteristik einer Solarzelle bei Temperaturen von 25 bis 120 °C

Messungen. Über eine lineare Regression folgt anschließend der $TK_{I_{sc}}$ zu 3,8 mA/K bzw. 0,04 %/K.

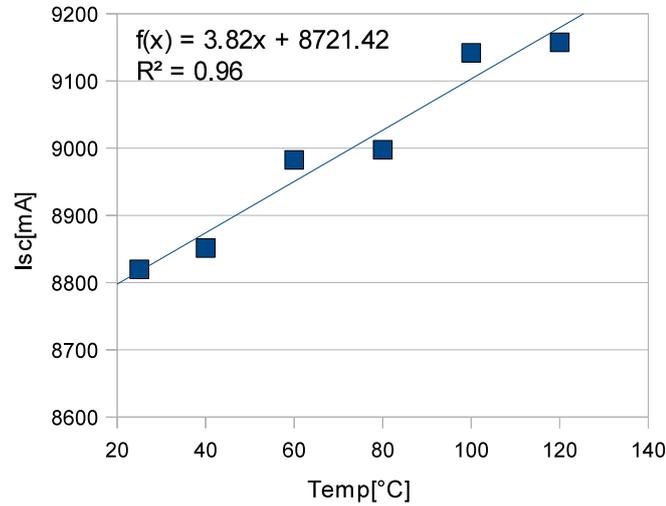


Abbildung 27: Verhalten des Kurzschlussstroms einer Zelle in Abhängigkeit von der Temperatur

4.6.2 Temperaturkoeffizient Leerlaufspannung $TK_{V_{oc}}$

Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung hängen über

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{qV_{oc}/k_B T} - 1 \right) \quad (9)$$

zusammen. Vernachlässigt man $-I_0$ und setzt für $I_0 = AT^\gamma e^{-E_{g0}/k_B T}$, so erhält man laut [13],

$$\begin{aligned} I_{sc} &= AT^\gamma e^{-E_{g0}/k_B T} e^{qV_{oc}/k_B T} \\ &= AT^\gamma e^{q(V_{oc}-E_{g0})/k_B T} \\ &= AT^\gamma e^{q(V_{oc}-V_{g0})/k_B T} \end{aligned} \quad (10)$$

wobei E_{g0} der theoretische *band gap* beim absoluten Nullpunkt und A die Zellfläche ist. Mit γ berücksichtigt man die übrigen Abhängigkeiten von I_0 . Weiters gilt $E_{g0} = qV_{g0}$. Ableitung von Gl. 10 nach der Temperatur T gibt:

$$\frac{dI_{sc}}{dT} = A\gamma T^{1/\gamma} e^{q(V_{oc}-V_{g0})/k_B T} + AT^\gamma \frac{q}{k_B T} \left(\frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{V_{oc} - V_{g0}}{T} \right) e^{q(V_{oc}-V_{g0})/k_B T}$$

Da $\frac{I_{sc}}{dT}$, wie unter 4.6.1 gezeigt, klein gegenüber dem Rest ist, kann es vernachlässigt werden und es folgt

$$\begin{aligned}
 -A\gamma T^{1/\gamma} e^{q(V_{oc}-V_{g0})/k_B T} &= AT^\gamma \frac{q}{k_B T} \left(\frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{V_{oc} - V_{g0}}{T} \right) e^{q(V_{oc}-V_{g0})/k_B T} \\
 -\gamma T^{1/\gamma} &= T^\gamma \frac{q}{k_B T} \left(\frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{V_{oc} - V_{g0}}{T} \right) \\
 \frac{dV_{oc}}{dT} &= -\frac{V_{oc} - V_{g0}}{T} - \frac{\gamma k_B T/q}{T} \\
 \frac{dV_{oc}}{dT} &= -\frac{V_{oc} - V_{g0} - \gamma k_B T/q}{T}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Man erhält einen indirekt proportionalen Zusammenhang zwischen Leerlaufspannung und Temperatur. Mit typischen Werten für Silizium ($V_{g0} \approx 1,2$ V, $V_{oc} \approx 0,62$ V, $\gamma \approx 3$ und $T = 300$ K) folgt:

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_{oc}}{dT} &\approx -\frac{1,2 - 0,62 + 0,078}{300} \\
 &\approx -2,19 \text{ mV/K}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Betrachtet man die gemessenen Werte der Leerlaufspannungen, und berechnet mittels linearer Regression den Temperaturkoeffizienten (Abbildung 28), so sieht man, dass die ermittelten Werte ($TK_{V_{oc}} \approx 2,05$ mV/K bzw. $\approx 0,31$ %/K) gut mit der Theorie übereinstimmen.

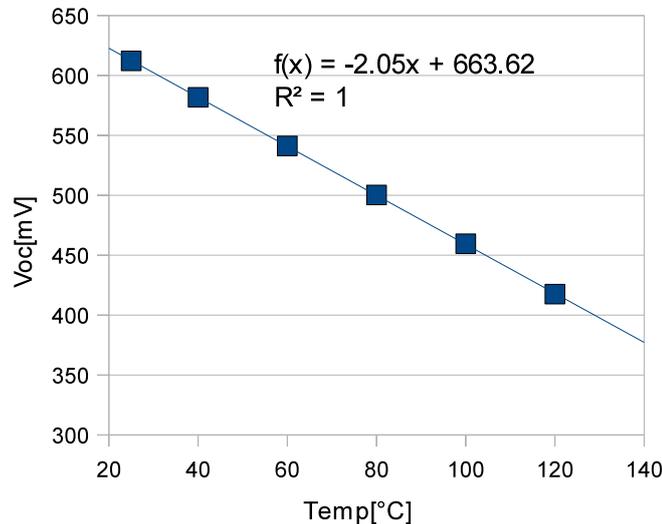


Abbildung 28: Verhalten der Leerlaufspannung einer Zelle in Abhängigkeit der Temperatur

4.6.3 Temperaturkoeffizient Füllfaktor TK_{FF}

Der Pseudo-Füllfaktor (ist der Füllfaktor der Solarzelle bereinigt um den Einfluss von parasitären Widerständen R_{ser} und R_{shunt}) einer idealen Solarzelle FF_0 kann analytisch nicht bestimmt werden. Allerdings lässt er sich nach [13] über die Näherungsformel

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} \quad (13)$$

sehr genau berechnen, wobei $v_{oc} = V_{oc}/(k_B T/q)$, die auf die Temperaturspannung U_T normierte Leerlaufspannung, ist. Daraus sieht man, dass der ideale Füllfaktor nur von der normierten Leerlaufspannung abhängt. Trägt man FF_0 über der Temperatur auf (Abbildung 29) so ergibt sich für Zellen mit einer Leerlaufspannung von 620mV bei STC ein TK_{FF_0} von $\approx 0,04\%/K$. ein Vergleich mit den realen Werten in Abbildung 29 zeigt einen deutlichen Unterschied. Da der der Pseudo-Füllfaktor per Definition ein vom Einfluss von parasitären Widerständen befreiter Füllfaktor ist, lässt sich dadurch der Einfluss des R_{ser} und R_{shunt} erkennen.

Für die betrachteten Solarzellen ergibt sich ein durchschnittlicher TK_{FF} von $\approx 0,11\%/K$.

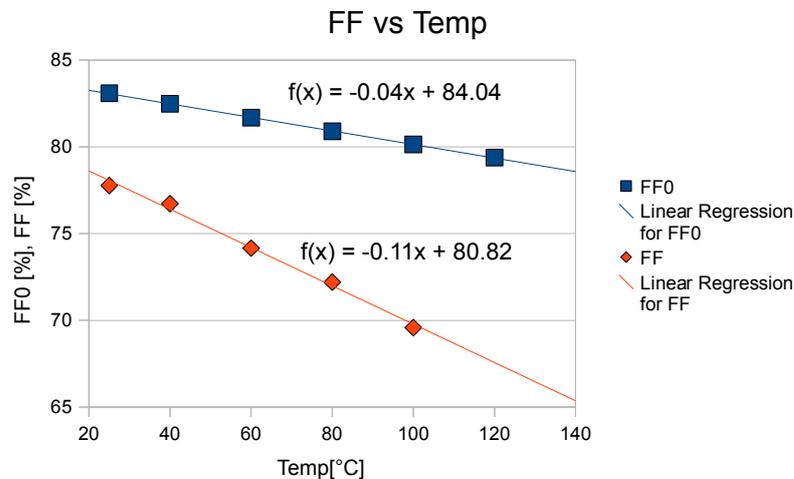


Abbildung 29: Verhalten des Füllfaktors einer Zelle in Abhängigkeit der Temperatur

4.6.4 Temperaturkoeffizient Maximum Power Point $TK_{P_{mpp}}$

Wie schon angedeutet ist die maximale Leistung einer Zelle wie folgt definiert

$$\begin{aligned} P_{mpp} &= I_{mpp} U_{mpp} \\ &= I_{sc} U_{oc} FF \end{aligned} \quad (14)$$

Den Temperaturkoeffizienten kann man von den TKs des Kurzschlussstroms, der Leerlaufspannung und des Füllfaktors abschätzen:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{mpp}}{dT} &= TK_{I_{sc}} + TK_{V_{oc}} + TK_{FF} \\ &= 0,04 \%/K + 0,31 \%/K + 0,11 \%/K \\ &\approx 0,46 \%/K \end{aligned} \tag{15}$$

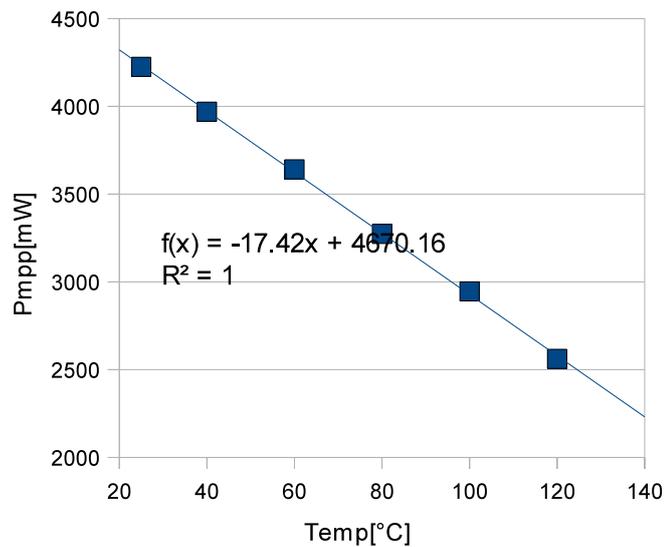


Abbildung 30: Verhalten des Maximum Power Points P_{mpp} einer Zelle in Abhängigkeit der Temperatur

Experimentell ermittelte Werte in Abbildung 30 ergeben einen Temperaturkoeffizienten von ≈ 17 mW/K bzw. $\approx 0,4$ %/K.

4.6.5 Temperaturkoeffizient Wirkungsgrad TK_{η}

Da der Wirkungsgrad einer Zelle der Quotient aus der Maximalen Leistung und der auf die Zellfläche auftreffende Lichtintensität ist, ergibt sich laut Abschätzung für eine pseudosquare-Zelle mit 156 mm Kantenlänge

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{dT} &= \frac{\frac{dP_{mpp}}{dT}}{239cm^2 1000W/m^2} \\ &\approx \frac{0,017}{23,9} \\ &\approx 0,07 \%/K \end{aligned} \tag{16}$$

Die Messergebnisse (Abbildung 31) zeigen, dass der TK bei den erwarteten 0,07 %/K liegt.

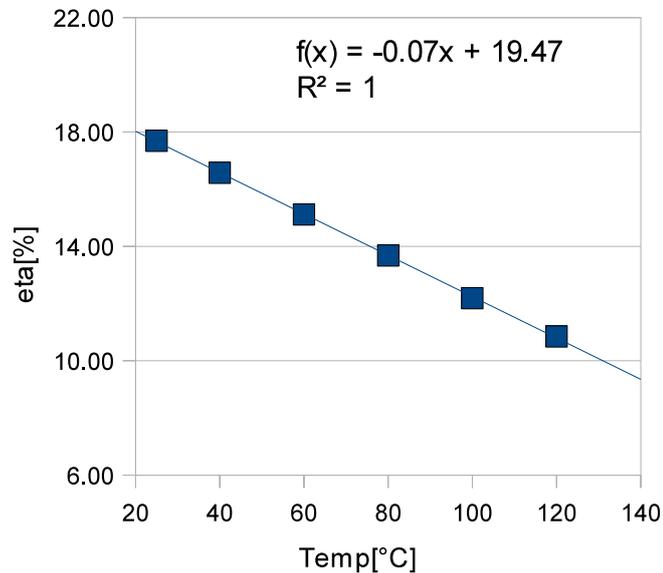


Abbildung 31: Verhalten des Wirkungsgrades einer Zelle in Abhängigkeit der Temperatur

4.7 Vergleich Offline- zu Inline-Charakterisierung

Das Inlinesystem unterscheidet sich in mehreren entscheidenden Punkten vom hier beschriebenen Offline-System (Solsim). Im Gegensatz zu einer kontinuierlichen Bestrahlung arbeitet das Inlinesystem mit einem *Flasher*, d.h. nur ein kurzer Lichtblitz von ca. 30ms wird verwendet um die Hellcharakteristik zu bestimmen. Die Anzahl der möglichen Messpunkte ist dadurch begrenzt. Weiters wird die zu vermessende Zelle nicht temperiert, sondern ihre Temperatur gemessen und das Messergebnis auf die erforderlichen 25 °C korrigiert. Die Kontaktierung der Zelle unterscheidet sich rückseitig ebenfalls von der des Offline-Solarsimulators. Das Inlinesystem verwendet wie auf der Vorderseite mehrere Kontaktstiftleisten um direkt auf die rückseitigen Busbars zu kontaktieren. Das Offlinesystem kontaktiert über den Thermochuck ganzflächig. Der große Vorteil des Inlinesystems liegt in der Messzeit pro Zelle. Innerhalb von einer Sekunde wird Hell- und Dunkelkennlinie einer Zelle bestimmt als auch eine optische Kontrolle der Vorder- und Rückseite durchgeführt. Eine Messung am Offline-Solarsimulator dauert in Abhängigkeit von der Auflösung mindestens eine Minute.

Betrachtet man die aus Hell- und Dunkelkennlinie gewonnen elektrischen Zellparameter, zeigen sich auch hier einige Unterschiede.

Kurzschlussstrom Der Kurzschlussstrom ist direkt proportional zur einfallenden Lichtleistung und damit von der Blitzdauer. Das Inlinesystem misst Kurzschlussstrom auf einer Monitorzelle des *Flashers* und rechnet so auf die Blitzdauer und Bestrahlungsdauer zurück. Staub, oder Wafersplitter auf der Monitorzelle verfälschen das Messergebnis deutlich. Der eigentliche Algorithmus zur Bestimmung des Kurzschlussstromes erfolgt gleich wie am Offline-Solarsimulator mittels linearer Regression um den Spannungsnulldurchgang. Der Unterschied zwischen Offline- und Inlinesystem ist in Abbildung 32 abgebildet. Beide Systeme ermitteln im Mittel den Sollwert der Referenzzelle. Das Inline-System zeigt aber eine stärkere Schwankung der Messwerte.

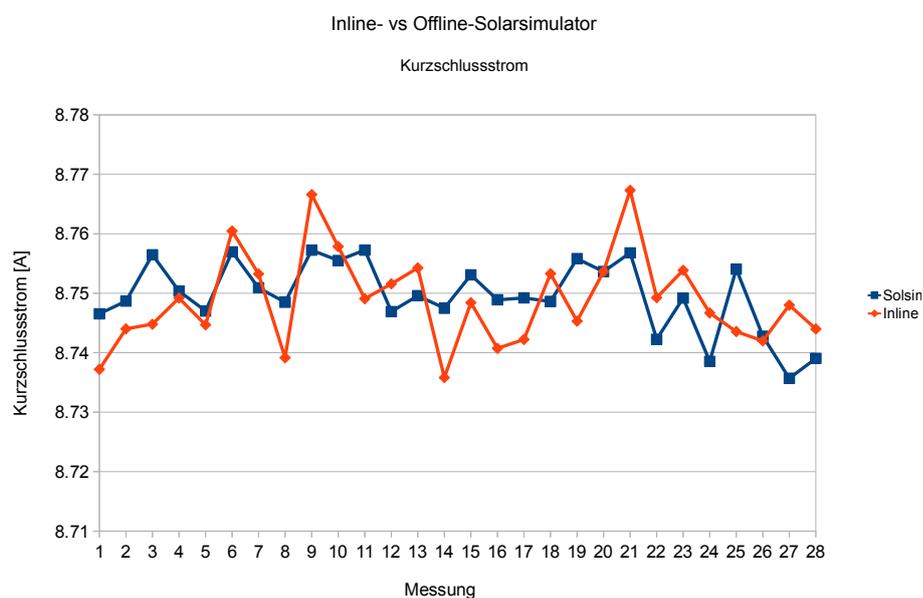


Abbildung 32: Vergleich des Inline- und Offline-Solarsimulators bei Bestimmung des Kurzschlussstroms einer Zelle bei Neukontaktierung

Leerlaufspannung Die Stabilität der Leerlaufspannung ist ein Maß für die Zelltemperatur und der Qualität der Temperaturmessung. Das Inlinesystem misst die Zelltemperatur über ein Pyrometer und berechnet dann mittels Korrektur über den Temperaturkoeffizienten der Leerlaufspannung auf die Leerlaufspannung bei STC zurück. Das Offline-System kontaktiert die Zelle großflächig auf der Rückseite und regelt die Zelltemperatur kontinuierlich bis die Solltemperatur erreicht wird. Abbildung 33 zeigt den Unterschied zwischen Inline- und Offline-Solarsimulator. Wie im Falle des Kurzschlussstromes rekonstruieren beide Systeme den Sollwert der Referenzzelle richtig, das Inline-System zeigt aber auch hier wieder eine etwas stärkere Varianz.

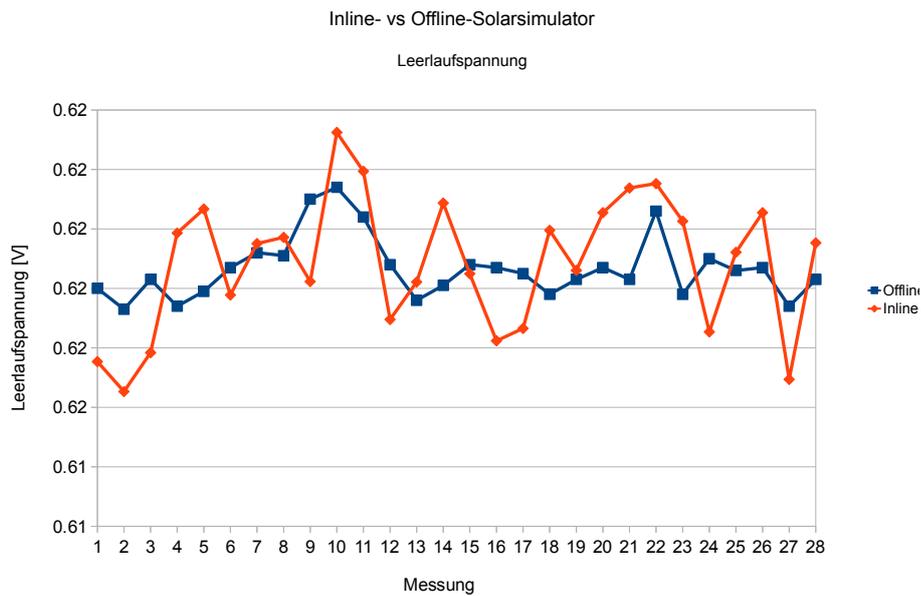


Abbildung 33: Vergleich des Inline- und Offline-Solarsimulators bei Bestimmung der Leerlaufspannung einer Zelle bei Neukontaktierung

Füllfaktor Der Füllfaktor ist für die messtechnische Sicht ein Maß für die Güte der Kontaktierung. Die ganzflächige Kontaktierung des Offline-Solarsimulator kontaktiert zwar nur auf das Aluminium und nicht auf die eigentlich dafür vorgesehenen Busbars, zeigt aber trotzdem bessere Füllfaktoren als das Inline-System, welches rück- wie vorderseitig mit Kontaktstiftpaaren kontaktiert (Abbildung 34). Zusätzliche Schwankungen werden durch manuelles Positionieren verursacht. Etwaiger Einfluss auf den systematischen Offset kann aber ausgeschlossen werden.

Wirkungsgrad Diese abgeleitete Größe aus den drei vorher bestimmten Parametern zeigt wie der Füllfaktor den erwarteten temperaturbedingten negativen systematischen Messfehler.

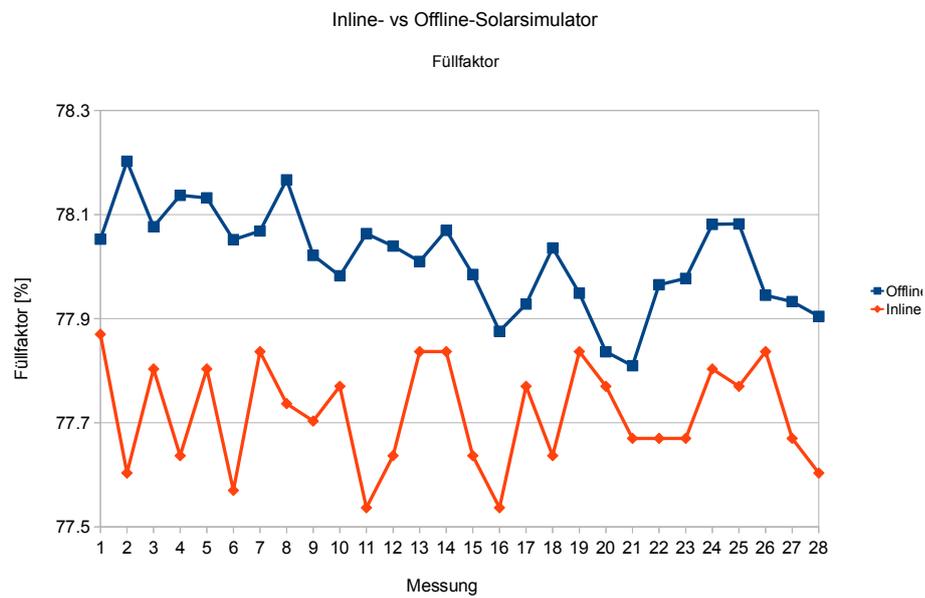


Abbildung 34: Vergleich des Inline- und Offline-Solarsimulators bei Bestimmung des Füllfaktors einer Zelle bei Neukontaktierung

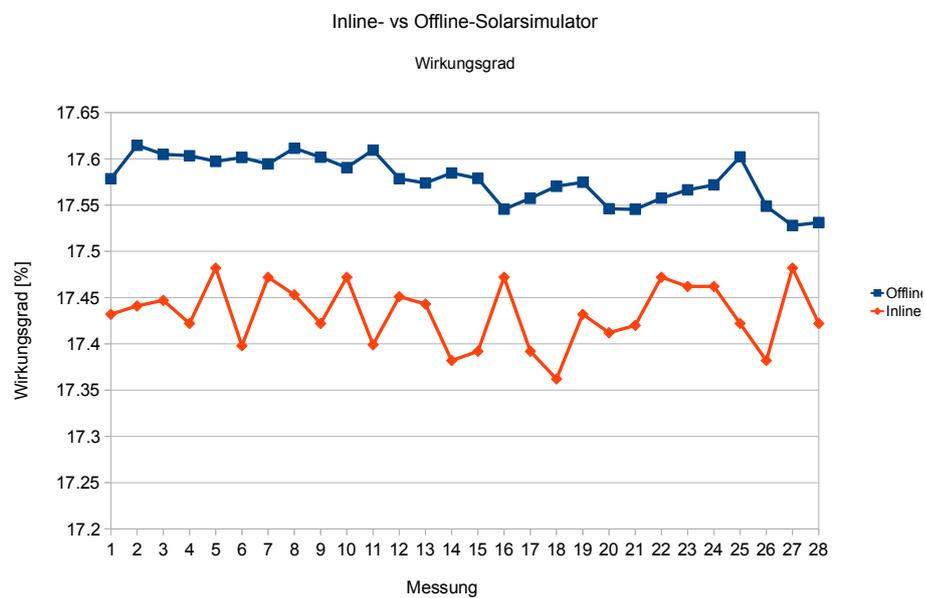


Abbildung 35: Vergleich des Inline- und Offline-Solarsimulators bei Bestimmung des Wirkungsgrades einer Zelle bei Neukontaktierung

5 Messmittelanalyse eines Offline Solarsimulators

5.1 Einleitung

Ziel dieses Kapitels ist es einen Überblick über die durchgeführte *MSA - Measurement System Analysis* durchzuführen um die Eignung eines Solarsimulators für den Produktionsbetrieb zu untersuchen. Der Solarsimulator selbst besteht aus einer Dauerlichtquelle der Firma Newport, einer *Source Measure Unit SMU* und einem Thermochuck samt zugehörigen Temperaturkontroller der Firma MB Technologies. Eine Prinzipdarstellung der Messeinrichtung ist in Abbildung 10 zu sehen. Eine ausführliche Abhandlung samt Begriffserklärung ist im Kapitel 4 zu finden. Die Eignung des Solarsimulator wurde nach den in [15] vorgeschlagenen Verfahren durchgeführt. Im Detail bedeutete dies, dass für jede für die Kalibration notwendige elektrische Größe (Kurzschlussstrom I_{sc} , Leerlaufspannung U_{oc} und Füllfaktor FF) das Messsystem für geeignet eingestuft werden muss. Zum besseren Verständnis wurde jeweils auch noch die Zelleffizienz η angeführt.

Für jede dieser elektrischen Größen wurde also die Eignung nach Verfahren 1 und Verfahren 2 bestimmt und Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt.

5.2 Verfahren zur Bestimmung des Fähigkeitsnachweises

Um einen Fähigkeitsnachweis für ein Messsystem zu ermitteln, haben sich verschiedene Verfahren etabliert, mit denen spezifisch gewisse Unsicherheitskomponenten gefunden werden können.

Tabelle 2: verwendete Verfahren um einen Fähigkeitsnachweis für ein Messsystem zu führen

Verfahren	Ziel	Kennwert(e)
Verfahren 1	Systematische Messabweichung, Wiederholbarkeit	C_g, C_{gk}, t -Test
Verfahren 2	Wiederhol-, Vergleichbarkeit (<i>mit</i> Bedienerinfluß)	%R&R
Verfahren 3	Wiederholbarkeit (<i>ohne</i> Bedienerinfluß)	%R&R

5.2.1 Auflösung eines Messsystems

Um eine zuverlässige Messung eines Merkmals durchführen zu können, muss vorab geprüft werden ob die Auflösung eines Messsystems mindestens 5% oder besser als der spezifizierte Toleranzbereich des Merkmals ist. Gilt es zum Beispiel den Kurzschlussstrom einer Solarzelle zu messen, gilt für diesen laut Kalibrationsinstitut 8,8 A \pm 100 mA. D.h. der gesamte Toleranzbereich wäre 200 mA und 5 % davon würden 10 mA entsprechen. Die Auflösung der verwendeten SMU im 20 A Messbereich liegt bei 100 μ A (= 0.05 %), d.h. sie ist für diese Anwendung geeignet.

5.2.2 Verfahren 1

Dieses Verfahren wird verwendet um Genauigkeit und Wiederholbarkeit zu bestimmen. Sie untersucht also den dem Messsystem innewohnende Messabweichung (engl. *gage capability*) und drückt dies durch die Fähigkeitsindizes C_g und C_{gk} aus. Diese Untersuchung wird üblicherweise vom Hersteller vor Auslieferung durchgeführt, um etwaige Mängel vorab zu erkennen, oder aber auch im Zuge einer Eingangskontrolle um die vom Hersteller/Zulieferer zugesicherten Spezifikationsgrenzen zu überprüfen. Da der Solarsimulator kein in sich fertiges Messsystem war, war es notwendig das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten im Detail zu untersuchen.

Die Durchführung einer solchen Untersuchung wird üblicherweise von einem Prüfer mit dem gleichen Standard 50mal (unter bestimmten Vorraussetzungen weniger, mindestens aber 20mal) durchgeführt, wobei der Standard jedesmal entfernt und wieder eingelegt wird. Vor Beginn der Messung muss das Messsystem kalibriert werden. Der gewählte Standard muss so gewählt werden, dass sein wahrer Wert x_m im Toleranzbereich des Prüfmerkmals liegt. Jegliche Veränderungen der Messeinrichtung während der 50 Messungen sind nicht zulässig. Die Messungen sollten zügig durchgeführt werden.

Die Leistung des Messsystems C_g wird folgendermaßen bestimmt:

$$C_g = \frac{0,2T}{4s_g} \quad (17)$$

wobei T die Toleranzbreite, s_g die Standardabweichung

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_g)^2} \quad (18)$$

und \bar{x}_g

$$\bar{x}_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (19)$$

der arithmetische Mittelwert der Messungen ist.

Mit der Gleichung 17 wird also ein Bereich von 20 % der Tolaranzbreite mit dem eigentlichen Streubereich der zu messenden Merkmale verglichen. Bei der Dimensionierung von Messsystemen (Laborgerätschaften) sollten aber nur maximal 10 % der Toleranzbreite des zu messenden Merkmals für die Fähigkeitsuntersuchung genutzt werden. Dies führt zur Bestimmung des Fähigkeitsindex für das Messsystem c_{gk} wie in Gleichung 20 dargestellt.

$$C_{gk} = \frac{0,1T - |\bar{x}_g - x_m|}{2s_g} \quad (20)$$

$\bar{x}_g - x_m$ beschreibt die systematische Messabweichung, Offset oder auch Bias.

Für den Fall, dass $C_{gk} \geq 1,33$ gilt die Messeinrichtung als fähig.

5.2.3 Verfahren 2

Zweck des Verfahrens 2 ist einen etwaigen Bedienerinfluss auf die Messung zu untersuchen. Mit Verfahren 2 wird der sogenannte %R&R Kennwert ermittelt, der Aussage über die Messeinrichtung samt aller möglichen Einflussgrößen gibt und beurteilt ob das Messsystem für die Messaufgabe geeignet ist. Voraussetzung für die Eignung nach Verfahren 2 ist eine Eignung nach Verfahren 1. Weiters muss ein Bedienerinfluss vorliegen (z.B. händische Positionierung der Probe, o.ä.). Für den Fall, dass man einen Bedienerinfluss gänzlich ausschließen kann (nur der Fall wenn von Beladung bis zum Abschluss der Messung der Messprozess automatisiert abläuft) wird Verfahren 3 angewandt. Das Produkt der Prüfer k , die Anzahl der Messobjekte n und die Anzahl der Messungen pro Prüfer r soll größer gleich 30 [15] sein.

Nachdem die zu messenden Objekte k_i nummeriert wurden, sind die Umgebungsbedingungen (Prüfer, Temperatur, u.ä.) genauso zu dokumentieren, wie die Messposition. Für den Standardfall von $k = 2$, $n = 10$ und $r = 2$ werden im Anschluss an die durchgeführten Messungen die Spannweiten (*engl. range*) ($x_{max} - x_{min}$) pro Messobjekt beider Prüfer berechnet, dann der Mittelwert der Einzelwerte der beiden Bediener \bar{x}_1 und \bar{x}_2 und deren mittleren Spannweiten \bar{R}_1 und \bar{R}_2 . Die Berechnung der Wiederholbarkeit (*EV Equipment Variation*) erfolgt über

$$EV = K_1 \cdot \bar{\bar{R}} \quad (21)$$

wobei $\bar{\bar{R}}$ der Mittelwert der mittleren Spannweiten ist.

Die Vergleichbarkeit (*AV Appraiser Variation*) ergibt sich zu

$$AV = K_2 \cdot \bar{x}_{diff} = K_2 \cdot (\bar{x}_{max} - \bar{x}_{min}) \quad (22)$$

Die Wiederhol- und Vergleichbarkeit (*R&R Repeatability and Reproducibility*) er-

gibt sich unter Zuhilfenahme von Gleichung 21 und Gleichung 22 zu

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (23)$$

$$\%R\&R = \frac{\sqrt{EV^2 + AV^2}}{RF} \cdot 100\% \quad (24)$$

Für die Eignung eines neuen Messsystems gilt, dass $\%R\&R \leq 20\%$ ist. Für Messsysteme in Verwendung gilt $\%R\&R \leq 30\%$.

5.2.4 Stabilitätsuntersuchung

Zur Beurteilung der Messbeständigkeit eines Messsystems wird eine Untersuchung über eine größere Zeitspanne durchgeführt. Die Dauer der Zeitspanne richtet sich nach Dauer der Messung selbst, sollte aber - wenn möglich - einem Arbeitstag / einer Schicht entsprechen. Die Messwerte x_m dürfen nicht mehr als 10 % der Toleranz vom Sollwert abweichen.

5.3 Ergebnis

Nachfolgende Betrachtungen der Messergebnisse beziehen sich auf die drei für die Kalibration entscheidenden Zellparameter Kurzschlussstrom I_{sc} , Leerlaufspannung U_{oc} und Füllfaktor FF . Zusätzlich wurde auch immer die Zelleffizienz η angeführt. Als Toleranzgrenzen wurden die vom Kalibrationsinstitut angegebenen Grenzen verwendet (es wurde die erweiterte Messunsicherheit verwendet, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Faktor $k=2$ ergibt, was einer Wahrscheinlichkeit des Messwerts von 95 % entspricht [26]).

5.3.1 Verfahren 1

Mit Verfahren 1 wird die Genauigkeit und eine etwaige systematische Messabweichung eines Messsystems bestimmt. Die bestimmten Kennwerte sind der c_g - und der c_{gk} -Wert. Man erkennt, dass der Kurzschlussstrom, als auch die Leerlaufspannung sowohl bzgl. Genauigkeit, als auch bzgl. systematischer Messabweichung als geeignet einzustufen sind. Gleiches gilt für die abgeleitete Größe Zelleffizienz. Der Füllfaktor, der ein Maß für die Kontaktierung darstellt, liegt außerhalb der erlaubten Grenzen. Aufgrund dessen wurde der Messablauf umgestellt, sodass pro Datenpunkt zwei Hellkennlinien aufgenommen wurden (einmal in normaler Lage, einmal wurde die Zelle um 180° gedreht). Als Datenwert wurde dann der Mittelwert der beiden Messungen verwendet. Dies führte zu einer c_g und c_{gk} Verbesserung von $\approx 0,4$ absolut, weil dadurch etwaige zufällige Messfehler nicht direkt in das Messergebnis einfließen.

Tabelle 3: Auflistung der c_g - und der c_{gk} -Werte des Solarsimulators für Kurzschlussstrom I_{sc} , Leerlaufspannung U_{oc} , Füllfaktor FF und Zelleffizienz η

Zellparameter	c_g	c_{gk}
Kurzschlussstrom I_{sc}	2,00	1,91
Leerlaufspannung U_{oc}	1,44	1,40
Füllfaktor FF	0,89	0,84
Zelleffizienz η	1,65	1,44

5.3.2 Verfahren 2

Das Verfahren 2 beschreibt die Fähigkeit eines Messsystems bezüglich Wiederhol- und Vergleichbarkeit einer Messung mit Bedienerinfluss. Als Kennwert liefert dieses Verfahren den % $R\&R$ -Wert. Das Ergebnis in tabellarischer Form ist in Tabelle 4. Alle Kenngrößen liegen innerhalb der erlaubten Grenzen.

Tabelle 4: Auflistung der % W , der % V und % $R\&R$ -Werte des Solarsimulators für Kurzschlussstrom I_{sc} , Leerlaufspannung U_{oc} , Füllfaktor FF und Zelleffizienz η

Zellparameter	% W	% V	% $R\&R$
Kurzschlussstrom I_{sc}	14,1 %	10,2 %	17,4 %
Leerlaufspannung U_{oc}	0,3 %	0,1 %	0,3 %
Füllfaktor FF	28,5 %	7,3 %	29,4 %
Zelleffizienz η	19,5 %	7,5 %	20,9 %

5.3.3 Stabilitätsuntersuchung

Um die Messbeständigkeit des Solarsimulators zu untersuchen, wurde über einen Zeitraum von sechs Stunden im Abstand von einer Stunde die zu untersuchenden Zellparameter Kurzschlussstrom I_{sc} , Leerlaufspannung U_{oc} , Füllfaktor FF und Zelleffizienz η bestimmt. Das zeitliche Verhalten der vier Parameter ist in den Abbildungen 36, 37, 38 und 39 abgebildet.

Das Ergebnis zeigt eine leicht steigende Tendenz des Kurzschlussstroms im Mittel, allerdings innerhalb der Eingriffsgrenzen. Die Leerlaufspannung zeigt einen deutlichen Trend, weshalb ein Rekalibrierungsintervall von vier Stunden eingeführt wurde.

Dieses Intervall kommt auch der Stabilität des Füllfaktors entgegen. Die Zelleffizienz zeigt stabiles zeitliches Verhalten.

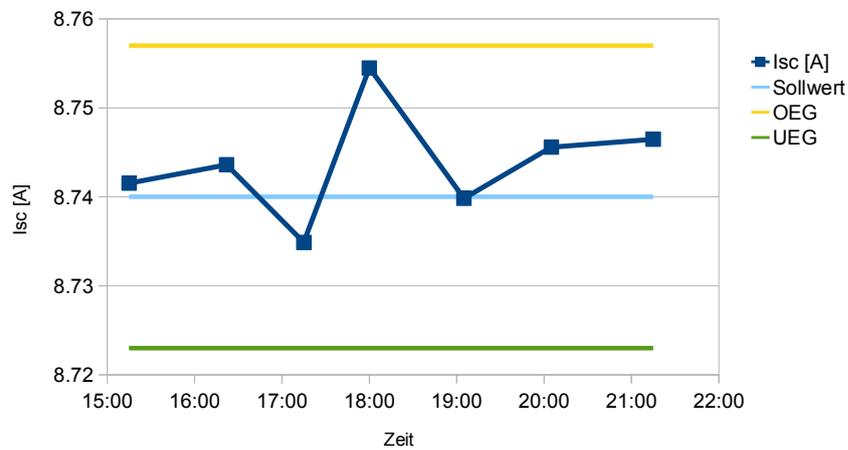


Abbildung 36: Stabilitätsuntersuchung des Kurzschlussstroms über einen Zeitraum von sechs Stunden

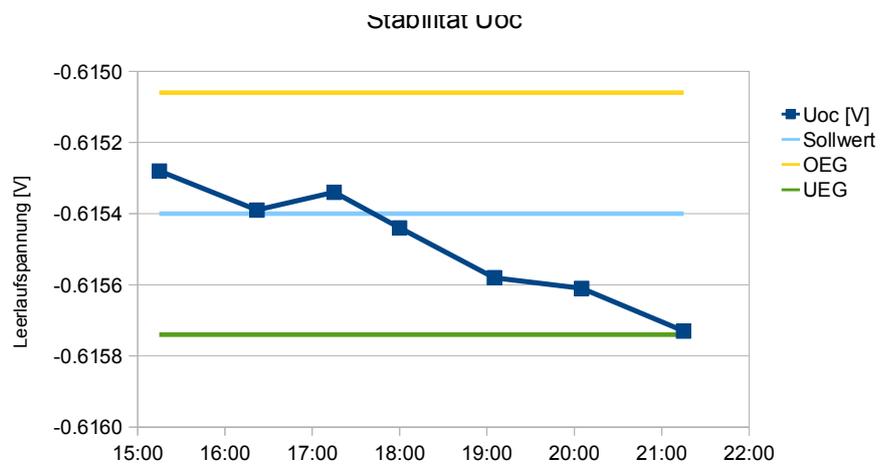


Abbildung 37: Stabilitätsuntersuchung der Leerlaufspannung über einen Zeitraum von sechs Stunden

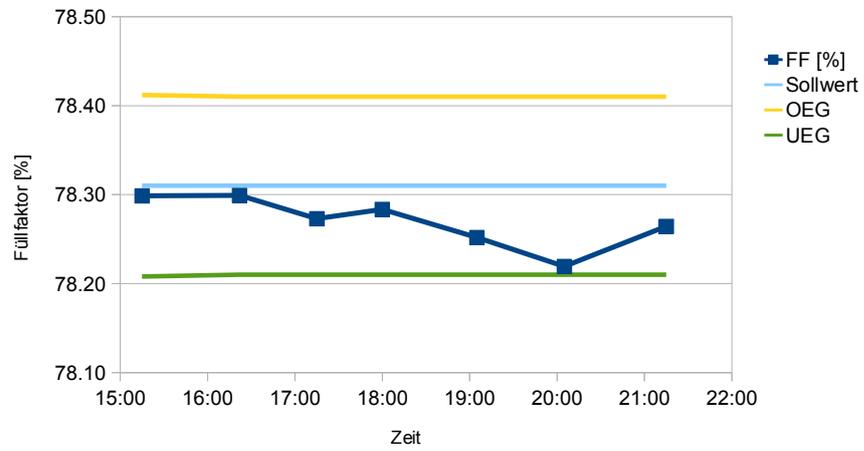


Abbildung 38: Stabilitätsuntersuchung des Füllfaktors über einen Zeitraum von sechs Stunden

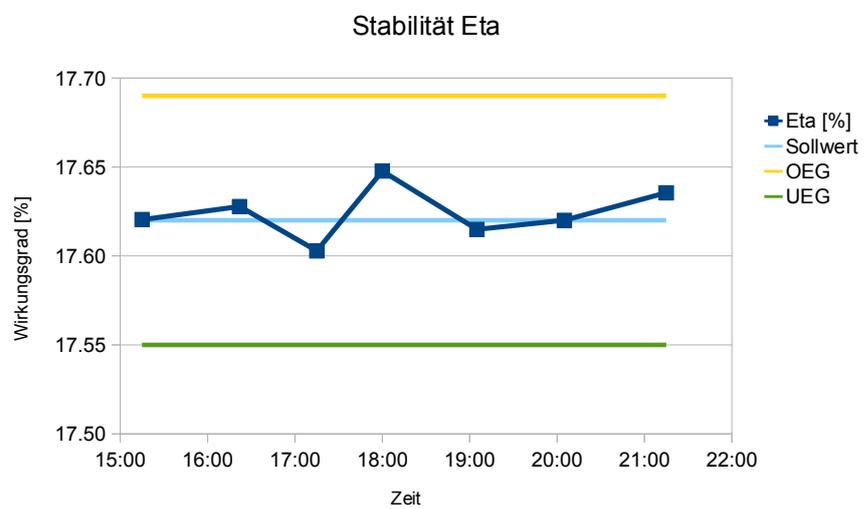


Abbildung 39: Stabilitätsuntersuchung der Zelleffizienz über einen Zeitraum von sechs Stunden

6 Kontaktwiderstand und Schottky Barrieren

6.1 Einleitung

Jedes Halbleiterbauteil wird über Kontakte kontaktiert und hat deshalb einen gewissen Übergangswiderstand bzw. Kontaktwiderstand. Dieser Kontakt kann entweder als Metall-Halbleiterkontakt, oder auch als Halbleiter-Halbleiterkontakt ausgeführt sein.

Ende des 19. Jahrhunderts erstmal betrachtet und von Schottky in den 30er Jahren verfeinert, wird jegliche Art von Metall-Halbleiter, dessen gleichrichtende Charakteristik sich über eine nichtlineare Strom-Spannungskennlinie zeigt, in der Literatur als *Schottky barrier devices* bezeichnet [17]. Ohm'sche Kontakte bzw. *ohmic contacts* haben im Gegensatz dazu eine lineare oder nahezu lineare Strom-Spannungskennlinie.

Für Solarzellen sind ohm'sche Kontakte wegen ihres geringen Kontaktwiderstandes wünschenswert, können aber aufgrund der verwendeten Materialien bzw. der Bedingungen bei der Aufbringung der Kontakte (Energiezustände innerhalb der verbotenen Zone an der Oberfläche = Oberflächenzustände) meist nicht realisiert werden. In der industriellen Praxis weisen die Metall-Halbleiterkontakte fast immer gleichrichtendes Verhalten (rectifying) auf. Durch geeignete Wahl der Dotierkonzentration kann die Potentialbarriere für die abzuführenden Ladungsträger aber sehr dünn gemacht und damit für die Ladungsträger durch den Tunneleffekt passierbar gemacht werden. Grundsätzlich lässt sich auf diese Art und Weise hochdotiertes Halbleitermaterial (wie der Emitter) sehr niederohmig kontaktieren, während bei niederdotiertem Material (Basis) eine entsprechend große Kontaktfläche realisiert werden muss, um eine hinreichend niederohmige Kontaktierung bewerkstelligen zu können.

6.2 Metal-Halbleiterkontakte

In Anlehnung an das Schottky Model wird die Barriere, die aufgrund eines Metal-Halbleiterüberganges entsteht, über die Lage der Energiebänder definiert (siehe Abbildung 40). Die obere Abbildung beschreibt jeweils den Verlauf vor, die untere Abbildung den Verlauf nach Kontaktbildung. Die Austrittsarbeit (engl. *work function*) eines Festkörpers kann als Energiedifferenz des Vakuumlevels zum Fermi-niveau des Festkörpers ausgedrückt werden. Die Austrittsarbeit des Metalls wird als Φ_M , die des Halbleiters als Φ_S bezeichnet. Das Potential des jeweiligen Festkörpers hängt über $\phi_M = \Phi_M/q$ mit der Austrittsarbeit zusammen. Man berechnet die resultierende Barrierenhöhe aus der Differenz der Austrittsarbeit des Metalls (ϕ_M) und der Elektronenaffinität (χ) des Halbleiters mit $\phi_B = \phi_M - \chi$. Ähnlich der Definition der Austrittsarbeit eines Festkörpers lässt sich auch die Elektronenaffinität χ eines Halbleiters über die Differenz des niedrigsten Niveaus des Leitungsbandes und dem Vakuumniveau an der Oberfläche eines Halbleiters definieren. Dies bedeutet, dass

die Barrierenhöhe nur von der Austrittsarbeit des Metalls und der Elektronenaffinität des Halbleiters und nicht von der Dotierkonzentration abhängt [18] (wenn man das *Spiegelladungsprinzip außen vor lässt*). Dadurch kann man die Barrierenhöhe durch Wahl von geeigneten Metallen leicht in ihrer Höhe beeinflussen, um die drei verschiedenen Kontaktarten (siehe Abbildung 40) herzustellen. ,

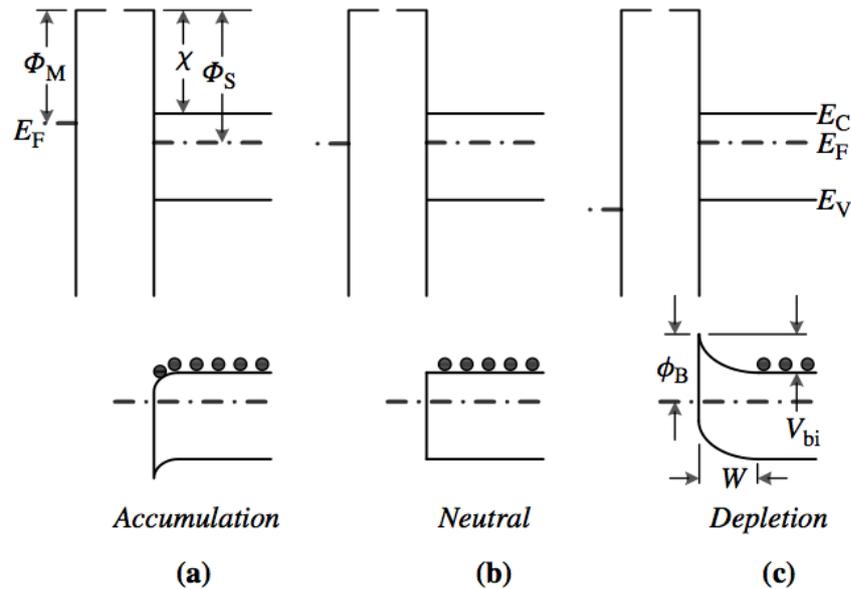


Abbildung 40: oben: vor Kontaktbildung; unten: nach Kontaktbildung; in Abhängigkeit der Austrittsarbeit des gewählten Materials, lassen sich drei verschiedene Arten von Kontakten (Akkumulation, Gleichgewicht und Verarmung) definieren [18]

- (a)** Akkumulation (*accumulation*) $\Phi_m \leq \Phi_s$ Die Bezeichnung Akkumulation deutet auf die Anhäufung der Majoritätsträger an der Grenzfläche Metall-Halbleiter im Vergleich zum neutralen Substrat hin und ähnelt deshalb einem ohm'schen Kontakt, da z.B. die Elektronen e^- eine gering ausgeprägte Barriere überwinden müssen um in oder aus dem Halbleiter zu fließen.
- (b)** Gleichgewicht (*neutral*) $\Phi_m \leq \Phi_s$ Unter Gleichgewicht versteht man, dass im Vergleich der Majoritätsträgerdichte an der Grenzfläche zu der Ladungsträgerdichte im Substrat kein Unterschied besteht.
- (c)** Verarmung (*depletion*) $\Phi_m \leq \Phi_s$ Unter Verarmung versteht man eine, im Vergleich zur Ladungsträgerdichte im Substrat reduziertes Vorhandensein von Majoritätsträgern an der Oberfläche. Dieser Zustand herrscht bei Solarzellen für die gängigen n - und p -Typ Emitter.

Im Gegensatz zur theoretischen Betrachtung von Schottky zeigt die experimentelle Erfahrung, dass die gängigsten Halbleiter (Ge, Si, GaAs, ...) nur eine sehr geringe Abhängigkeit der Barrierenhöhe von der Austrittsarbeit der jeweiligen untersuchten Metalle haben [19]. Um einen Kontakt herzustellen der Akkumulationscharakter besitzt, muss man demnach auf andere Mittel zurückgreifen. Obwohl die Barrierenhöhe unabhängig von der Dotierkonzentration ist, beeinflusst die Dotierkonzentration dennoch die Barrierenbreite (siehe Abbildung 41).

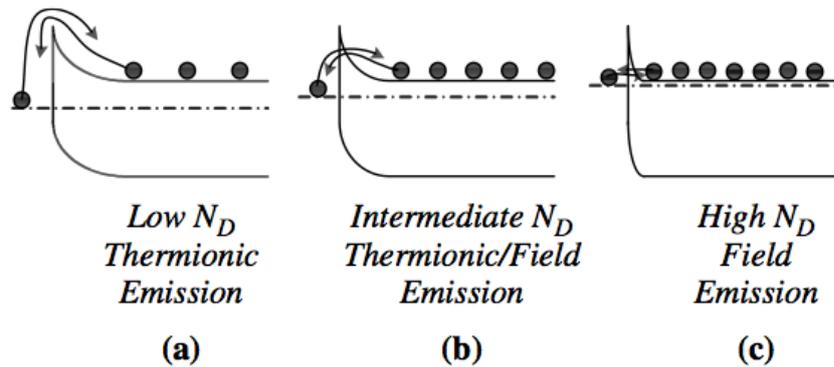


Abbildung 41: In Abhängigkeit von der Dotierkonzentration N_D bildet sich die Barrierenbreite eines Schottkykontakts unterschiedlich aus [18]

Sehr stark n -dotierte Halbleiter haben eine schmale Raumladungszone W , die annähernd nur von der Dotierkonzentration N_D abhängt. Es gilt $W \sim N_D^{-1/2}$. Elektronen können über solch einen Metall-Halbleiterkontakt in das Substrat bzw. auch in die Gegenrichtung *tunneln*. Für Löcher in p -dotierten Halbleitern gilt derselbe Sachverhalt, wie in Abbildung 42 dargestellt.

Im Falle eines leicht dotierten Halbleiters kann der Strom aufgrund von thermischer Anregung über die Barriere (*thermionic emission TE*) fließen. Für mäßig hoch dotierte Halbleiter gilt der Fall der *thermionic-field emission TFE*, wo die Ladungsträger durch thermische Anregung ein Energieniveau erreichen, wo die Barriere dünn genug ist um durchzutunneln. Bei stark dotierten Halbleitern herrscht die sogenannte *field emission FE* vor, da aufgrund der hohen Dotierkonzentration die Barriere durchgehend dünn genug ist, dass auch an der unteren Bandgrenze des Leitungsbandes Ladungsträger direkt durch die Barriere tunneln können.

Mathematisch lassen sich die drei Emissionsarten durch betrachten der charakteristischen Energie nach [20]

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N}{K_s \epsilon_0 m_{tun}^*}} \quad (25)$$

unterscheiden. Vergleicht man E_{00} mit der thermischen Energie kT , so gilt

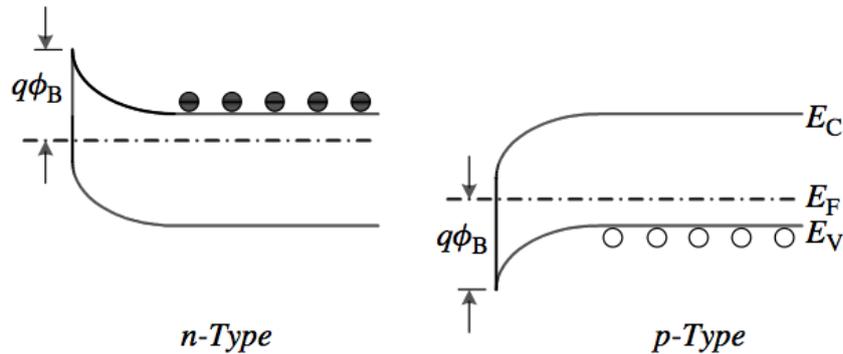


Abbildung 42: Ausbildung eines Verarmungskontaktes in Abhängigkeit von der Dotierung [18]

$kt \gg E_{00}$ thermionic emission TE
für Si gilt dies bei ca. $N_D \leq 10^{17} \text{cm}^{-3}$

$kt \approx E_{00}$ thermionic-field emission TFE
für Si gilt dies bei ca. $10^{17} < N_D < 10^{20} \text{cm}^{-3}$

$kt \ll E_{00}$ field emission FE
für Si gilt dies bei ca. $N_D \geq 10^{20} \text{cm}^{-3}$

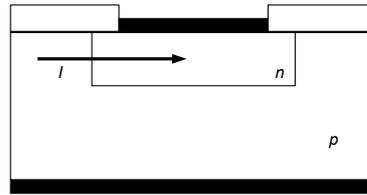
In der Praxis wird nur die oberflächennahe Dotierkonzentration sehr hoch sein, und in die tiefe kontinuierlich abnehmen. Dadurch ergibt sich für den Kontaktwiderstand, dass er sich aus der Summe von Metal-Halbleiter- und (für n -dotierte Halbleiter) n^+n -Kontaktwiderstand zusammensetzt. Für den Fall, dass der Metall-Halbleiterkontaktwiderstand überwiegt gilt näherungsweise der Fall eines gleichmäßig dotierten Halbleiters.

6.3 Kontaktwiderstand und Einfluss der effektiven Kontaktfläche

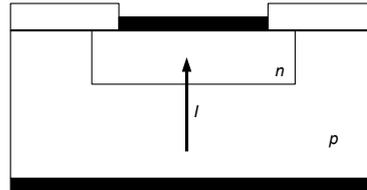
Für die Bestimmung des Kontaktwiderstands spielt die für den Stromfluss effektive Kontaktfläche eine entscheidende Rolle, da sich unter Berücksichtigung der Richtung des Stromflusses (siehe Abbildung 46) in oder aus dem Kontakt unterschiedliche Zustände einstellen.

Für den Fall einer Struktur wie in Abbildung 44 ergibt sich für den gesamten Widerstand R_{ges} zwischen den Punkten A und B

$$R_{ges} = 2R_m + 2R_c + R_{semi} \quad (26)$$



(a) lateraler Kontakt



(b) horizontaler Kontakt

Abbildung 43: Unter der Berücksichtigung der Richtung des Stromflusses, ergeben sich unterschiedliche effektive Kontaktflächen, die im Falle eines lateralen Stromflusses (a) kleiner ausfallen, als bei einem horizontalen Kontakt

mit $R_{semi} = R_{sheet_{nLayer}}$.
 R_c besteht aus

- dem Grenzflächenwiderstand von Metall zu Halbleiter *specific interfacial resistivity* ρ_i
- einem kleinen Teil des Metalls direkt über und unter dem Kontakt
- etwaigen *current crowding* Effekten (siehe Kapitel 6.4.2)
- Zwischenschichten (z.B. Oxiden) zwischen den Metal- und Halbleiterlayern.

Um Kontaktwiderstände unabhängig von ihrer geometrischen Ausdehnung miteinander vergleichen zu können, führt man den Begriff des spezifischen Kontaktwiderstandes ρ_c [$\Omega \cdot \text{cm}^2$] ein.

Für eine homogene Kontaktfläche gilt mit der Kontaktfläche F :

$$\rho_c = R_C \cdot F \quad (27)$$

6.4 Messtechnische Bestimmung des Kontaktwiderstandes

Prinzipiell unterscheidet man 4 Kategorien zu Bestimmung des Kontaktwiderstandes nach [18]:

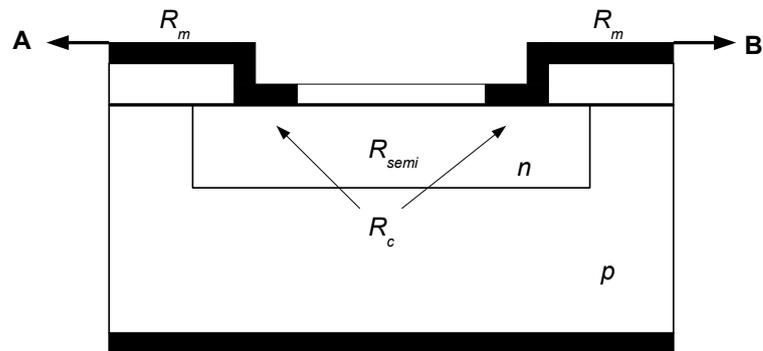


Abbildung 44: Prinzipdarstellung von zwei Kontakten die über einen dotierten Layer miteinander verbunden sind, sowie Darstellung der zwischen den Punkten A und B vorherrschenden Widerstandsanteilen

1. *Two-Contact Two-Terminal Method*
2-Kontakt-Methode: der Gesamtwiderstand zwischen 2 Kontakten wird über **eine** Strom-/Spannungsmessung bestimmt, und daraufhin auf den Kontaktwiderstand rückgerechnet
2. *Multiple-Contact Two-Terminal Method*
Mehrkontakt-Methode: der Gesamtwiderstand zwischen mehreren Kontakten unterschiedlichen Abstands wird über **eine** Strom-/Spannungsmessung gemessen
3. *Multiple-Contact Four-Terminal Method*
Mehrkontakt-Methode, mit dem Unterschied, dass zwei Strom-/Spannungsmessungen gleichzeitig ausgeführt werden und dadurch den Einfluss des Schichtwiderstands minimieren.
4. *Multiple-Contact Six-Terminal Method*
Mehrkontakt-Methode: eine Erweiterung der *four-terminal* Methode, die noch zusätzlich die Möglichkeit bietet den Schichtwiderstand unter dem Kontakt zu bestimmen.

Jede dieser Methoden bestimmt nicht den Grenzflächenkontaktwiderstand ρ_i , sondern den spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c .

6.4.1 Two-Contact Two-Terminal Method

In der Praxis wird, wenn diese Methode trotz ihrer hohen Fehleranfälligkeit (Einfluss der Messspitzen, ...) überhaupt eingesetzt wird, meist eine laterale Struktur wie in

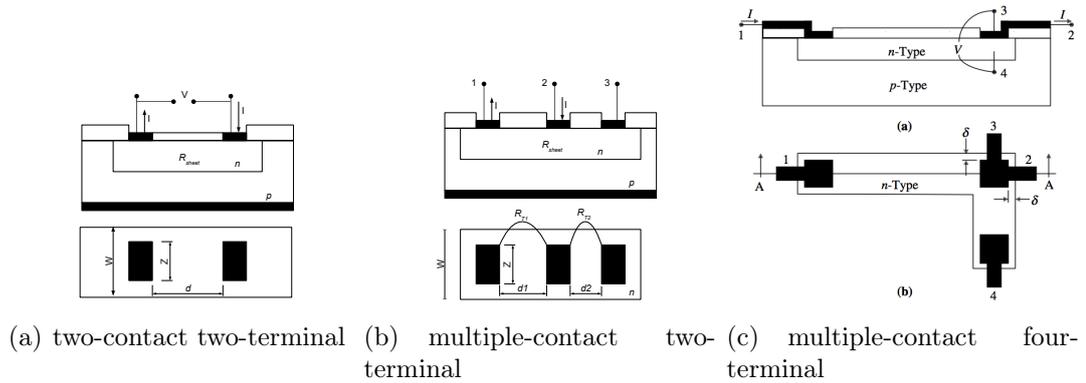


Abbildung 45: Gegenüberstellung von Teststrukturen der 2- und Mehrkontakt Methoden

Abbildung 46 verwendet. Die durch die Raumladungszone isolierte n -dotierte Schicht verbindet zwei Metal-Halbleiterkontakte, wodurch aufgrund einer Spannung V ein Strom I fließen wird, dessen Höhe durch den Widerstand R_{ges} bestimmt wird. Es gilt

$$R_{ges} = R_{sheet}d/W + R_d + R_w + 2R_c \quad (28)$$

mit R_{sheet} als dem Schichtwiderstand des n -dotierten Layers, R_d dem durch *current crowding* hervorgerufenen Widerstand unterhalb der Kontakte, R_w als Korrekturfaktor wenn $Z < W$ und dem Kontaktwiderstand R_c . Die Detailansicht in Abbildung 47 versucht dies nochmal zu verdeutlichen.

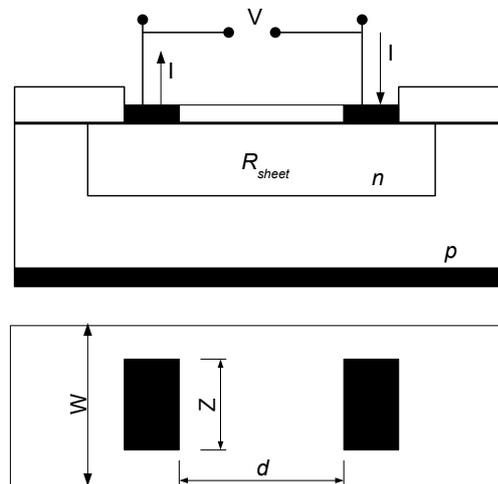


Abbildung 46: 2-Kontakt Methode: Prinzipdarstellung des Querschnitts und der Aufsicht einer Messstruktur

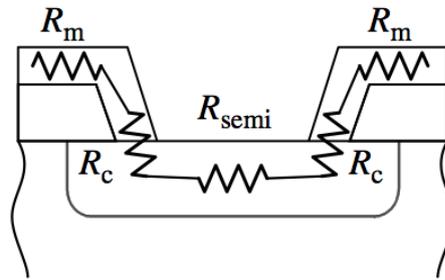


Abbildung 47: 2-Kontakt Methode: Detaildarstellung der Widerstandsverteilung

6.4.2 Multiple-Contact Two-Terminal Method

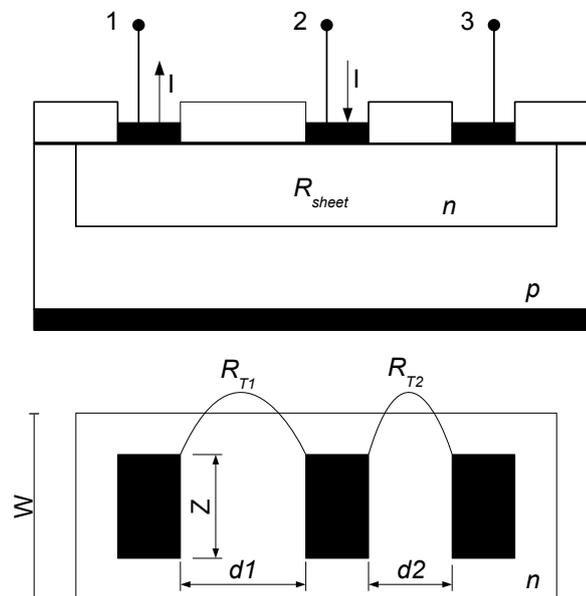


Abbildung 48: Mehrkontakt Messung: Prinzipdarstellung

Diese Methode entspricht eigentlich einer verbesserten *two-terminal two-contact* Methode, welche die Nachteile dieser berücksichtigt. Hierfür werden drei identische Kontakte, die wiederum über einen pn-Übergang isoliert sind, wie in Abbildung 48 vermessen und der Effekt der unterschiedlichen Kontaktabständen d_1 und d_2 ausgenutzt. Unter der Annahme, dass der Kontaktwiderstand R_c für alle drei Kontakte

gleich ist, gilt

$$\begin{aligned} R_{T1} &= R_{sheet} \frac{d_1}{W} + 2R_c \\ R_{T2} &= R_{sheet} \frac{d_2}{W} + 2R_c \\ R_{Ti} &= R_{sheet} \frac{d_i}{W} + 2R_c \Big|_{i=1,2} \end{aligned} \quad (29)$$

umgeformt nach R_{sheet} gilt

$$\begin{aligned} R_{sheet} &= \frac{(R_{T1} - 2R_c)W}{d_1} \\ R_{sheet} &= \frac{(R_{T2} - 2R_c)W}{d_2} \end{aligned}$$

gleichgesetzt und nach R_c umgeformt ergibt

$$R_c = \frac{R_{T1}d_2 - R_{T2}d_1}{2(d_2 - d_1)} \quad (30)$$

Wie aus der Gleichung 30 ersichtlich ist, hat dieser Ansatz den großen Vorteil, dass sowohl der Substrat- als auch der Schichtwiderstand unbekannt sein können. Nachteilig kann sich die Annahme auswirken, dass die Kontaktwiderstände der drei einzelnen Kontakte ident sein sollen. Für den Fall, dass sich die Kontakte allerdings in geringen Abstand zueinander befinden, kann der Annahme sehr wohl genüge getan werden. Eine weitere Fehlerursache besteht darin, dass der Kontaktwiderstand R_c aus der Differenz zweier großer Zahlen berechnet wird, was gerade bei sehr kleinen Kontaktwiderständen problematisch ist. Zusätzlich ist die Bestimmung der beiden Abstände d_1 und d_2 kritisch.

Current Crowding Um den spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c direkt zu messen, ist obiger Ansatz ungeeignet und erfordert eine genauere Betrachtung des Stromflusses. Für die unter Abbildung 48 abgebildete Struktur liegt ein lateraler Stromfluss in und aus den Kontakten zugrunde. Abbildung 49 zeigt prinzipiell wie sich der Stromfluss in einem Kontakt verhält. Der Strom fließt, wie in Abbildung 54 gezeigt, durch den Halbleiter über die Widerstände R_{sheet} und $\rho_c/\delta A$ in den Kontakt. δA bezeichnet eine infinitesimale Kontaktfläche. Betrachtet man den Potentialverlauf über den Kontakt (von 0 bis L) so sieht man einen exponentiellen Abfall der Spannung V über der Distanz x (Gleichung 31, [21]).

$$V(x) = \frac{I\sqrt{R_{sheet}\rho_c}}{Z} \frac{\cosh[(L-x)/L_T]}{\sinh(L/L_T)} \quad (31)$$

Per Definition wird die Strecke, bei der die Spannung auf den $1/e$ -ten Teil abgesunken ist, als *transfer length* L_T bezeichnet.

$$L_T = \sqrt{\rho_c / R_{sheet}} \quad (32)$$

Die *transfer length* gibt also den Bereich an, wo der größte Teil des Stromes vom Halbleiter in den Kontakt bzw. vom Kontakt in den Halbleiter fließt. Für den Fall eines Silbervorderseitenkontakts einer Solarzelle mit einem Emitterschichtwiderstand von $R_{sheet} = 80 \Omega/\square$ und einem spezifischen Kontaktwiderstand eines siebgedruckten Fingers von $\rho_c = 8 m\Omega cm^2$ würde dies einer *transfer length* L_T von $10 \mu m$ entsprechen. Sprich nur $2/10$ eines $100 \mu m$ breiten Fingers wäre eigentlich für die elektrische Leitfähigkeit vom Halbleiter in den Finger relevant, die restlichen $80 \mu m$ wären für die Kontaktierung elektrisch inaktiv.

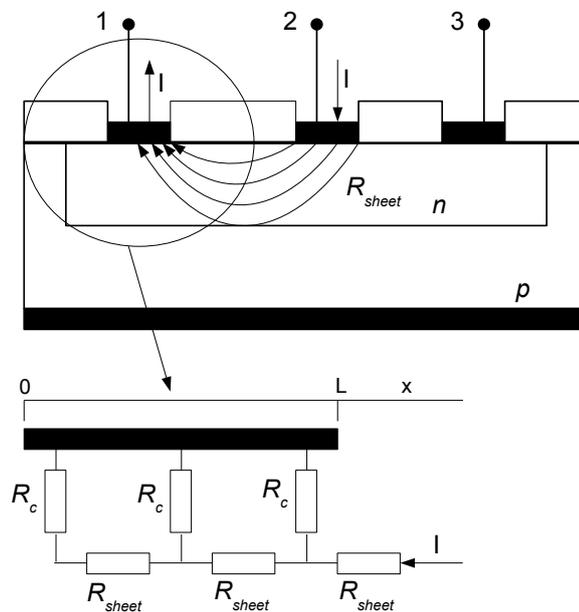


Abbildung 49: *current crowding* bezeichnet den Effekt, dass die für den Strom aktive Kontaktfläche u.U. kleiner als die eigentliche Kontaktfläche sein kann. Das obere Bild zeigt den Querschnitt durch einen Kontakt und die Abhängigkeit der Stromdichte von der Kontaktlänge L ; das untere Bild zeigt ein Ersatzschaltbild dieses Effekts

Prägt man zwischen den Kontakten 1 und 2 den Strom I ein und misst die Spannungsabfall gilt laut Ohm'schen Gesetz

$$\begin{aligned}
 R_c &= \frac{V}{I} \\
 &= \frac{\sqrt{R_{sheet}\rho_c}}{Z} \coth(L/L_T) \\
 &= \frac{\rho_c}{L_T Z} \coth(L/L_T) \tag{33}
 \end{aligned}$$

für den Fall das $Z = W$ gilt. Für $W \gg Z$ würde ein Teil des Stromes auch um die Kontaktecken herumfließen und dadurch das Ergebnis verfälschen. Das Ergebnis des \coth wird allein vom Verhältnis von L/L_T bestimmt und Gleichung 33 kann, wie unter Tabelle 5 angedeutet, näherungsweise vereinfacht werden. Die effektive Kontaktfläche $A_{c,eff}$ variiert in Abhängigkeit des Kontaktwiderstands und des zu kontaktierenden Layers. Dies bedeutet aber gleichfalls, dass die effektive Stromdichte im Bereich des elektrisch aktiven Kontakts für den Fall $L \geq 1,5L_T$ um ein Vielfaches höher, als bei der geometrischen Auslegung vorgesehen, sein kann.

Tabelle 5: Näherungsweise lässt sich aufgrund des Verhältnisses von L/L_T die Formel zur Bestimmung des Kontaktwiderstandes R_c vereinfachen

Anahme	Vereinfachung	Ergebnis	$A_{c,eff}$
		$R_c = \frac{\rho_c}{L_T Z} \coth(L/L_T)$	
$L \leq 0,5L_T$	$\coth(L/L_T) \approx L_T/L$	$R_c \approx \frac{\rho_c}{LZ}$	LZ
$L \geq 1,5L_T$	$\coth(L/L_T) \approx 1$	$R_c \approx \frac{\rho_c}{L_T Z}$	$L_T Z$

Wannenbreite $W \neq$ Kontaktbreite Z Das Verhältnis von Wannenbreite zu Kontaktbreite spielt für die erzielbare Genauigkeit der Bestimmung des Kontaktwiderstandes eine wichtige Rolle. Die Annahme das $Z = W$ ist, gilt nur für theoretische Betrachtungen und kann praktisch nicht realisiert werden. Untersuchungen von [22] zeigen, dass der Fehler zunimmt wenn ρ_c abnimmt, oder R_{sheet} zunimmt. Dem Fehler liegt der Potentialverlauf über den Kontakt (siehe Gleichung 31 zugrunde, da dadurch auch ein Teil des Stromflusses um den Kontakt herum fließen kann (Abbildung 50). Für den Fall, dass δ sehr groß wird, ist der gemessene Kontaktwiderstand proportional zum Schichtwiderstand des zu kontaktierenden Layers und nur noch bedingt vom Kontaktwiderstand selbst abhängig. Eine mögliche Abhilfe schafft die Verwendung von kreisförmiger Kontaktstrukturen (Abbildung 51).

kreisförmige Strukturen Sie bestehen aus einem für die Kontaktbildung aktiven inneren Kreis mit dem Radius L , einem Ring mit der Breite d , der den inneren

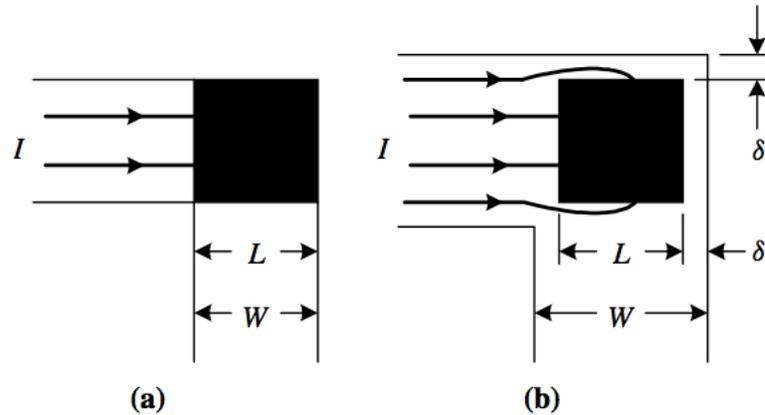


Abbildung 50: Einfluß der Wannenbreite W auf den Stromfluß, (a) $W = Z$, (b) $W > Z$



Abbildung 51: Kreisförmige Kontaktflächen ermöglichen den Einfluss der Wannenbreite W auf die Messungenauigkeit des Kontaktwiderstands zu verringern. Der innere Kreis und der äußere Bereich entsprechen den Kontaktflächen, die durch einen Ring der Breite d unterbrochen sind

Kreis, von der äußeren Kontaktfläche trennt. Unter der Annahme eines konstanten Schichtwiderstands unterhalb aller Strukturen, $L \gg L_T$ und $d/L \ll 1$ ergibt sich der Kontaktwiderstand laut [18] zu

$$R_T = \frac{R_{sheet}}{2\pi L} (d + 2L_T) \quad (34)$$

Transfer Length Method TLM Ausgehend von der Struktur mit drei Kontakten in Abbildung 48, wird eine Leiterstruktur realisiert, die allerdings mehr als 3 Kontakte besitzt. Abbildung 52 zeigt eine Prinzipdarstellung. Die Vorteile der in (b) abgebildeten Struktur liegen bei näherer Betrachtung auf der Hand. Wird z.B. ein gewisser Strom zwischen den Kontakten 1 und 3 eingepreßt und vermisst man die Spannung zwischen den Kontakten, so müsste man den gleichen Wert messen, wie in Struktur (b) mit gleichem Kontaktabstand. Dem ist aber nicht so. Der eigentlich inaktive Kontakt 2 verfälscht das Ergebnis unter gewissen Umständen merklich. Für $L \ll L_T$ wird der laterale Stromfluss nahezu unbemerkt vom Kontakt 2 zu Kontakt 3

fließen. Für $L \gg L_T$ allerdings, wird der Weg durch den inaktiven Kontakt für Teile des Stroms den Weg des geringeren Widerstands darstellen, trotz der zweimaligen Überwindung des Übergangswiderstandes Halbleiter-Metall bzw. Metall-Halbleiter. Deshalb sollte die in (b) abgebildete Struktur bei Kontaktbreiten von $L \geq L_T$ unbedingt verwendet werden.

Für Kontakte mit $L \geq 1,5L_T$ gilt unter Berücksichtigung von Gleichung 33 und der in Tabelle 5 postulierten Vereinfachung für den gemessenen Widerstand zwischen zwei Kontakten näherungsweise

$$R_T = \frac{R_{sheet}d}{Z} + 2R_c \quad (35)$$

$$\approx \frac{R_{sheet}}{Z}(d + 2L_T) \quad (36)$$

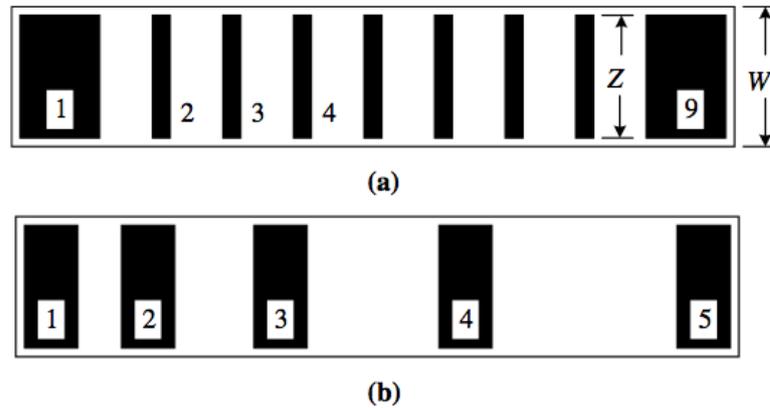


Abbildung 52: Zwei mögliche Ausführungsarten einer TLM Teststruktur, (a) hat Kontakte in äquidistanten Abständen, (b) hat ungleiche Kontaktabstände

Vermisst man nun die Widerstände zwischen den einzelnen Kontaktpaaren und trägt sie über den Kontaktabstand d auf, so ergibt sich ein Bild wie in Abbildung 53. Wie dort schon angedeutet, kann man über die Steigung der linearen Regressionsgeraden auf den Schichtwiderstand R_{sheet} schließen, über den Schnittpunkt mit der Ordinate auf den Kontaktwiderstand R_c und der Schnittpunkt mit der Abszisse auf die *transfer length* L_T . Zusätzlich lässt sich über die drei ermittelten Werte über Gleichung 32 auf den spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c schließen.

Nachteile dieses Messverfahrens liegen darin, dass bei sehr flachen Steigungen der Schnittpunkt mit der Abszisse und somit L_T schwierig zu bestimmen ist. Weiters können Schwankungen bei der Messung selbst den Korrelationsfaktor R^2 der Regressionsgeraden beeinflussen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Annahme, dass der

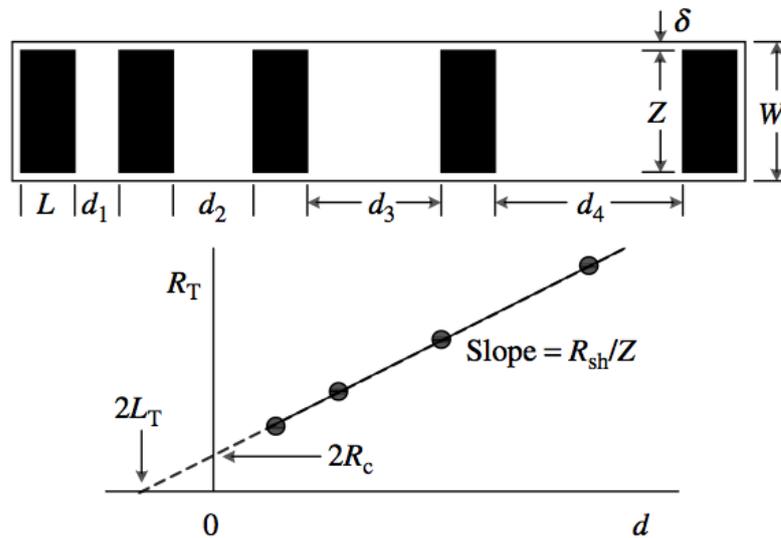


Abbildung 53: TLM Teststrukturen mit ungleichen Kontaktabständen bieten die Möglichkeit zusätzlich zum Kontaktwiderstand R_c auch noch den darunterliegenden Schichtwiderstand R_{sheet} als auch die Transferlength L_T aus dem Messergebnissen zu konstruieren

Schichtwiderstand der zu kontaktierenden Schicht konstant sein soll. Auch wenn vor der Kontaktbildung ein homogener Layer erzeugt wurde, bedeutet dies nicht, dass nach Kontaktbildung der Schichtwiderstand unter den Kontakten gleich dem zwischen den Kontakten ist. Abschließend sei noch erwähnt, dass ein möglicher Einfluss eines inhomogenen Kontaktmaterials (in den meisten Fällen siebgedrucktes Silber oder Aluminium) für diese Betrachtungen völlig außer Acht gelassen wurde.

6.5 Multiple-Contact Four-Terminal Method

Kelvin Teststruktur Abbildung 54 zeigt die Kelvin Teststruktur, wobei zwischen den Kontakten 1 und 2 der Messstrom eingepreßt wird und zwischen den Kontakten 3 und 4 die Potentialdifferenz $V_{34} = V_3 - V_4$ gemessen wird. Die zugrundeliegende Idee besteht darin, dass das Potential des Kontakts 4 gleich dem Potential des n -Layers direkt unter Kontakt 2/3 ist. Dadurch misst man nur den Spannungsabfall des Metal-Halbleiterübergangs von Kontakt 2/3 in den n -Layer. Daher lässt sich der Kontaktwiderstand R_c mit

$$R_c = \frac{V_{34}}{I} \quad (37)$$

bestimmen und der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c ergibt sich in Abhängigkeit zur Kontaktfläche A_c laut [23] zu

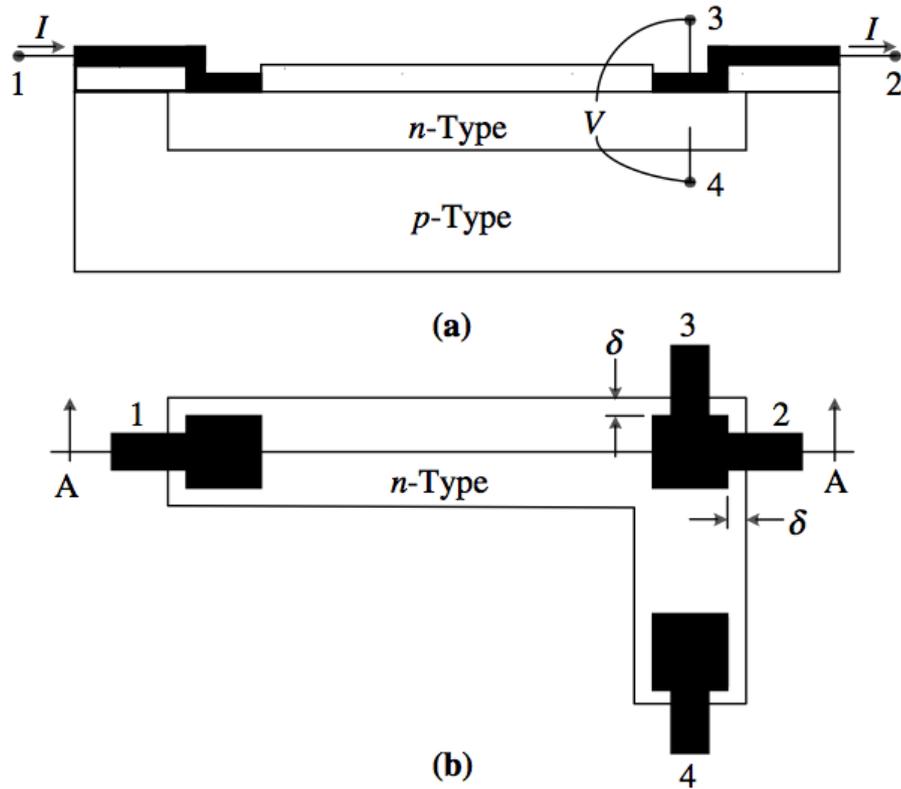


Abbildung 54: Kelvin Teststruktur zur Bestimmung des Kontaktwiderstands aus [18]; (a) zeigt den Querschnitt; (b) die Aufsicht

$$\rho_c = R_c A_c \quad (38)$$

6.6 Praktische Evaluation der Teststruktur

Anstatt der Vorderseitenmetallisierung mit Busbars und Fingern wird die in Abbildung 55 abgebildete Teststruktur gedruckt und gefeuert.

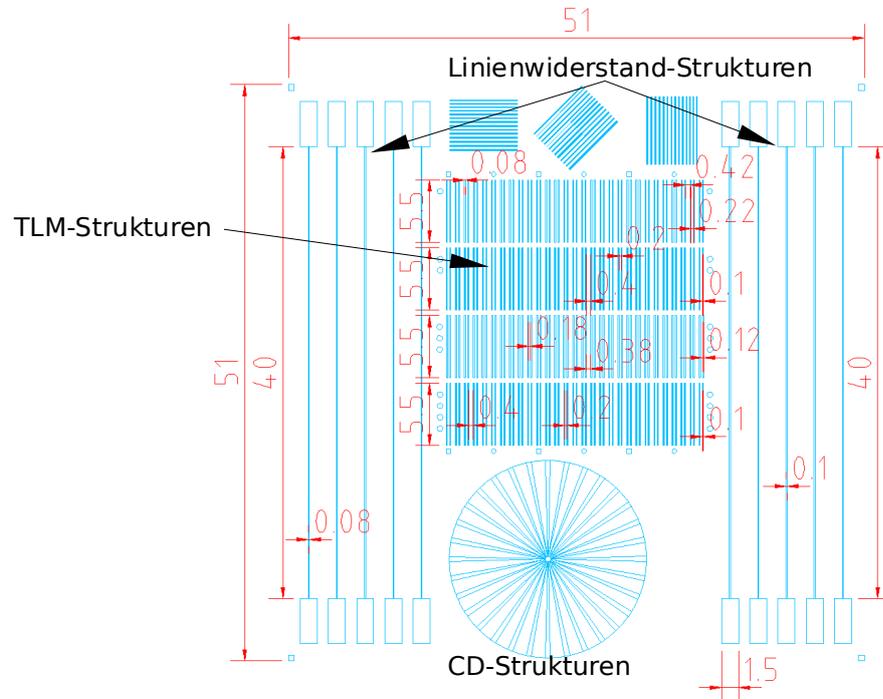


Abbildung 55: Teststruktur zur Bestimmung von Linien- und Kontaktwiderstand der Zelle. Die sonnenförmige *CD* (*critical dimension*)-Struktur dient zur Beurteilung der Druckbarkeit von verschiedenen Druckrichtungen. Etwaige Längenangaben (rot) in mm

6.6.1 Linienwiderstandsmessungen

In Abhängigkeit von den Linienbreiten von 80 und 100 μm wird der Längswiderstand des 4 cm langen Fingers bestimmt. Deshalb wurde zwischen den beiden Kontaktpads ein Strom eingepreßt, der ungefähr dem Kurzschlussstrom eines Fingers bei STC (Standard Test Conditions) entspricht und der dadurch verursachte Spannungsabfall gemessen. Der Linienwiderstand eines 1 cm langen Fingers kann dann mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes über

$$\rho_f = \frac{1}{4} \frac{U_{sense}}{I_{force}} [\Omega/cm] \quad (39)$$

bestimmt werden.

Wie in Tabelle 6 und Abbildung 56 zu sehen, sind die Linienwiderstände wie erwartet emitterunabhängig und liegen im Bereich von kleiner 200 mΩ/cm. Der Widerstand der nominell 100 μm breiten Struktur liegt mit 121 mΩ/cm um ca. 40 mΩ/cm unter dem Wert der 80 μm breiten Struktur. Als Referenz können die Messergebnisse einer vorhergegangenen Messung herangezogen werden (mit ¹ gekennzeichnet). Der Unterschied lässt sich auf die veränderten Messbedingungen (Nadeln vs. PogoPins; 2-Punkt Messung vs. 4-Punkt Messung) zurückführen.

Tabelle 6: Ergebnis der Linienwiderstandsmessungen

d [mm]	R_{sheet} [Ω/□]	$length$ [mm]	$R_{line_{mean}}$ [Ωcm ⁻¹]	$R_{line_{min}}$ [Ωcm ⁻¹]	$R_{line_{max}}$ [Ωcm ⁻¹]	$R_{line_{range}}$ [Ωcm ⁻¹]
0.08	55	40	0,165	0,157	0,184	0,027
	65	40	0,191	0,159	0,272	0,113
	75	40	0,188	0,159	0,263	0,105
	80	40	0,172	0,159	0,208	0,049
	Referenz 1 ¹	40	0,200	0,188	0,226	0,039
	Referenz 2 ¹	40	0,216	0,203	0,490	0,046
0.1	55	40	0,121	0,115	0,127	0,012
	65	40	0,142	0,118	0,219	0,102
	75	40	0,154	0,118	0,225	0,107
	80	40	0,126	0,120	0,130	0,010
	Referenz 1 ¹	40	0,154	0,146	0,160	0,015
	Referenz 2 ¹	40	0,165	0,150	0,188	0,038

6.6.2 Kontaktwiderstandsmessungen

Die zweistufigen TLM-Strukturen entsprechen denen in Abbildung 48. Über Gleichung 30 kann dann der Kontaktwiderstand bestimmt werden. Vernachlässigt man etwaige *current crowding* Effekte, dann kann man über Normierung des Kontaktwiderstands auf die Kontaktfläche den spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c berechnen.

Da die Abstände d , d_1 und d_2 direkt in das Ergebnis des Kontaktwiderstandes einfließen, müssen diese möglichst genau bestimmt werden. Da eine siebgedruckte Linie immer ein relativ unregelmässiges *bleeding* (Paste die aufgrund der texturierten Waferoberfläche unter der Emulsion hervorquillt) aufweist, ist diese Bestimmung nicht trivial. Zur Illustration wie die tatsächlichen Abstände bestimmt wurden, dienten

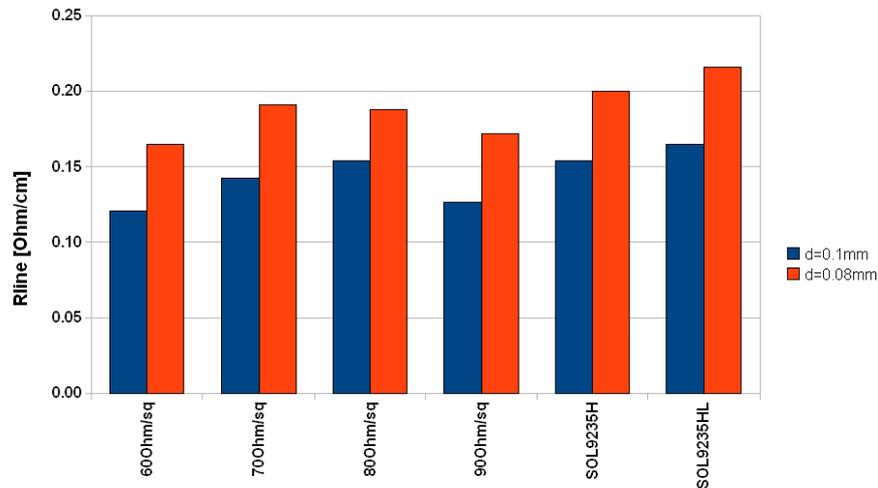


Abbildung 56: Ergebnis der Linienwiderstandsmessungen

einerseits Aufnahmen mit einem Lichtmikroskop (Abbildung 57) und andererseits Aufnahmen mit einem Konfokalmikroskop (Abbildung 58).

Aus Tabelle 7 erkennt man einen spezifischen Kontaktwiderstand des 55 Ω/sq Emitters von ca. 3 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$, was einer Verbesserung von 2 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ gegenüber vorigen Messungen entspricht. Wie bei den Linienwiderstandsmessungen kann dies auf die unterschiedliche Messanordnung zurückgeführt werden.

Aus Tabelle 8 und Abbildung 59 ist ein deutlicher, allerdings linearer Anstieg (2.9 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ pro 10 Ω) des Kontaktwiderstandes mit steigendem Emitterschichtwiderstand zu sehen. Schwankungen bei den Messungen, die durch die großen Standardabweichungen ersichtlich sind, wurden durch Inhomogenitäten des Emitters verursacht, und dabei höchstwahrscheinlich die Konzentration des oberflächennahen Phosphors, was sich auf den Schottky-Kontakt zwischen Silberpaste und Emitter zurückführen lässt (siehe 6.2).

Eine Abhängigkeit des Kontaktwiderstands von der Peaktemperatur im Firing Ofen ist bei einem Emitterschichtwiderstand von nominell 55 Ω/sq nicht zu erkennen.

6.6.3 Neuentwurf der TLM Struktur

Aufgrund der in den einleitenden Kapiteln vorgestellten Theorie wurden ein überarbeitetes Layout zur Bestimmung der Linien- und Kontaktwiderstände entworfen (Abbildung 60). Durch die unterschiedlichen Längen der Linienwiderstandsstrukturen wurde auf die Länge der Einheitszelle von 2 und 3 Busbarzellen Rücksicht genommen. Die Kontaktwiderstandsstrukturen entsprechen dem im Kapitel 6.4.2 theoretisch vorgestellten TLM-Struktur mit unterschiedlichen Kontaktabständen.

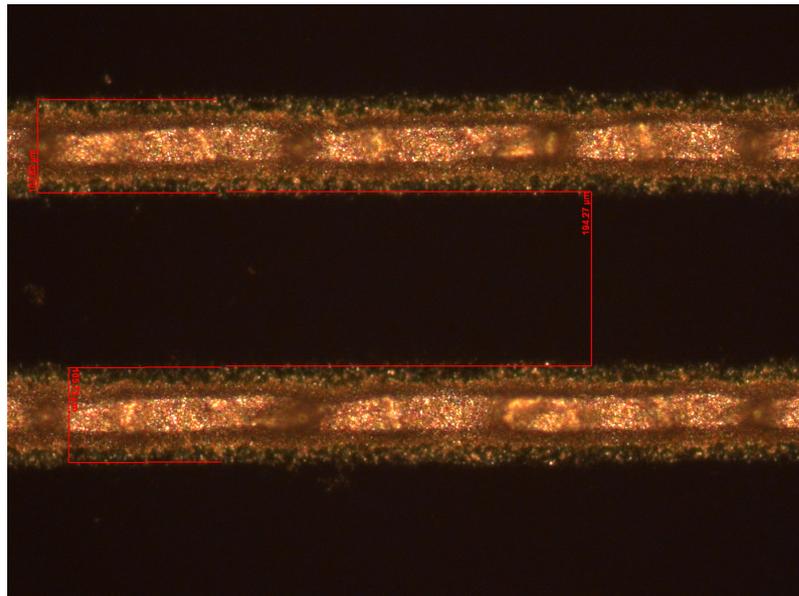


Abbildung 57: Lichtmikroskopaufnahme eines Kontaktpaares einer TLM Struktur zur Bestimmung der geometrischen Verhältnisse zur anschließenden Berechnung des Kontaktwiderstandes

Messergebnisse liegen zu diesem Zeitpunkt leider noch nicht vor.

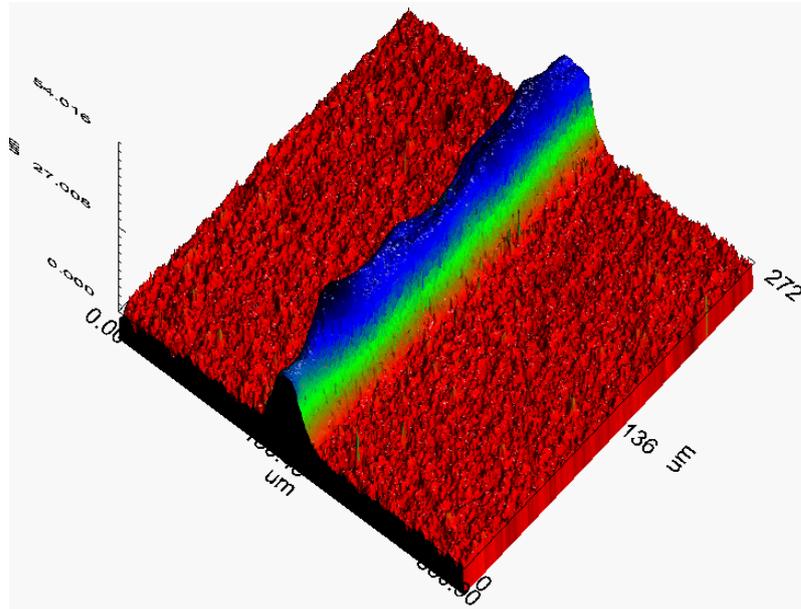


Abbildung 58: Konfokalmikroskopaufnahme eines siebgedruckten Fingers einer TLM Struktur

Tabelle 7: Spez. Kontaktwiderstände und die zugehörigen Kontaktwiderstände in Abhängigkeit von verschiedenen Teststrukturen und Peak-Temperaturen im Firingofen

R_{sheet} [Ω/sq]	Struktur Nr.	PeakTemp [$^{\circ}C$]	ρ_{mean} [$m\Omega cm^2$]	R_{Cmean} [$m\Omega$]	
55	S1,S2,S3	890,885	2,8	418	
	S1	890,885	2,41	391	
	S2	890,885	3,32	454	
	S3	890,885	5,07	515	
	S1	890	2,22	360	
	S1	885	2,61	422	
	S2	890	3,22	440	
	S2	885	3,37	460	
	S3	890	3,92	457	
	S3	885	5,09	593	
	Referenz	S1	890	4,94	-
	Referenz	S2	890	7,45	-
Referenz	S3	890	6,96	-	

Tabelle 8: Ergebnis der spez. Kontaktwiderstandsmessung

R_{sheet} [Ω/sq]	ρ_{mean} [$m\Omega cm^2$]	ρ_{stddev} [$m\Omega cm^2$]
60	2,80	4
70	5,82	4,44
80	8,11	2,99
90	11,65	3,69

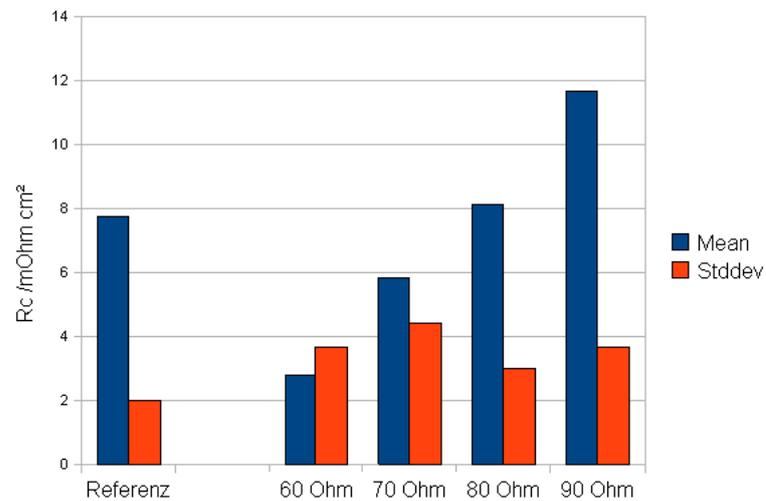


Abbildung 59: Ergebnis der spez. Kontaktwiderstandsmessung

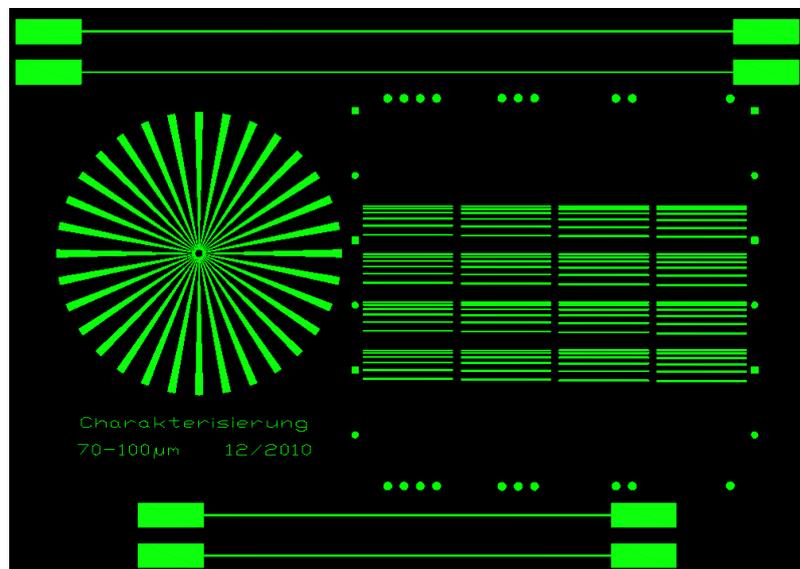


Abbildung 60: Ausschnitt aus der neuentworfenen Teststruktur zur Linien- und Kontaktwiderstandsbestimmung

7 Optimierung des Vorderseitenlayouts

Ziel ist die Optimierung des Frontseitenlayouts für verschiedene Emitterschichtwiderstände aufbauend auf den Ergebnissen der Linien- und Kontaktwiderstandsmessungen (6). Durch einen iterativen Algorithmus (siehe Abbildung 61) wird unter Angabe des Fingerwiderstands R_{line} , des spezifischen Kontaktwiderstands ρ_c , des Emitterschichtwiderstands R_{sheet} , der optisch, wie auch elektrisch maßgebenden Finger- und Busbarbreiten (W_f und W_b), den Strom- und Spannungsverhältnissen im Maximum Power Point (J_{mpp} und V_{mpp}) und den Abmessungen der Einheitszelle die optimale Fingeranzahl und der optimale Fingerabstand (in Relation zu Abschattungs- und Widerstandsverlusten) berechnet.

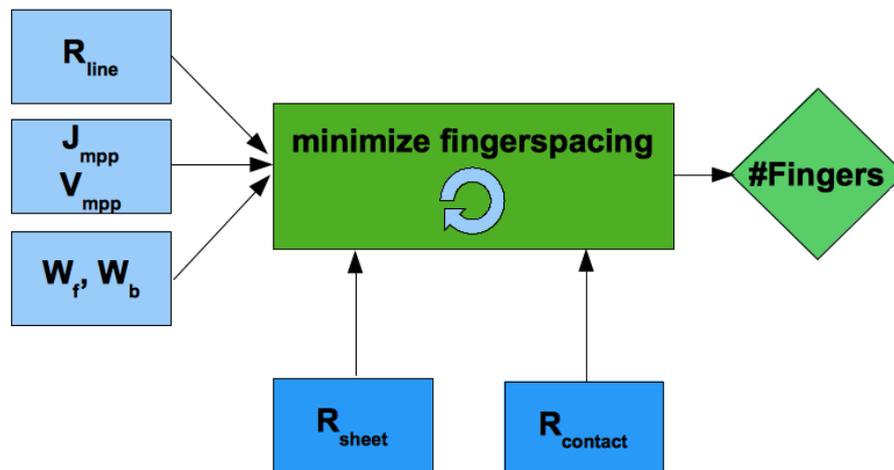


Abbildung 61: Linien-, Schicht- und Kontaktwiderstand, Finger- und Busbarbreiten und die Strom- und Spannungsverhältnisse im MPP liefern im Endeffekt die optimale Anzahl der Finger pro Wafer

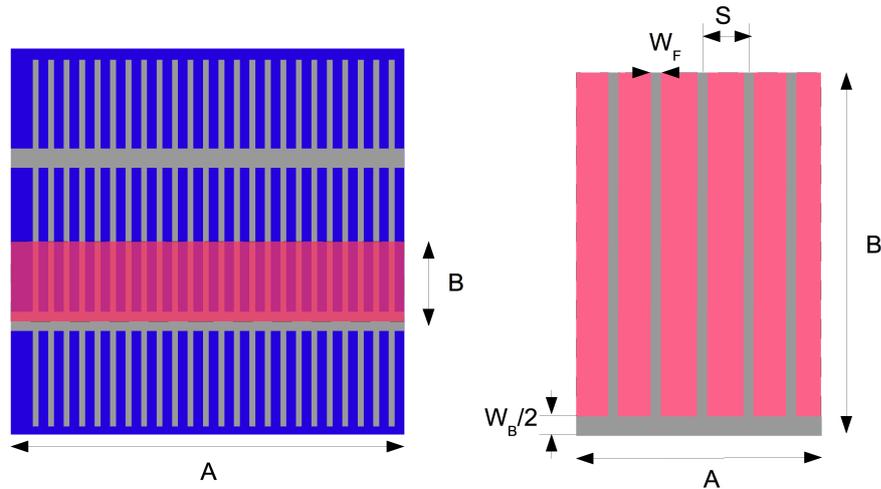


Abbildung 62: links: Prinzipdarstellung einer 2-Busbarzelle; rechts: Einheitszelle mit Darstellung ihrer Abmessungen: Länge A , Breite B , Fingerbreite W_F , Busbarbreite W_B , Fingerabstand S

Bezugnehmend auf die Einheitszelle (Abbildung 62) und deren Abmessungen lässt sich mit dem von [25], [24] und [12] beschriebenen iterativen Algorithmus eine Optimierung der Front-Metallisierung für verschiedene Emitterschichtwiderstände durchführen. Als Inputparameter werden die tatsächlichen Zellabmessungen A , B , W_F und W_B , sowie Linienwiderstand ρ_{line} , spezifischer Kontaktwiderstand ρ_c und die elektrische Charakteristik im Maximum Powerpoint J_{mpp} und V_{mpp} verwendet (siehe Tabelle 10).

Durch breitere Finger und breitere Busbars verringert man den durch beide Metallisierungen verursachten I^2R Leistungsverlust (solange die Breite der Finger die *transfer length* nicht unterschreitet hat dies auch keine Auswirkung auf den Kontaktwiderstand). Andererseits wird aber durch Verbreiterung der Metallisierung auch der Abschattungsverlust erhöht. Zwischen diesen beiden gegenläufigen Effekten gilt es ein Optimum, wenn

- konstanter Fingerabstand
- homogener Emitterschichtwiderstand und
- homogene Einstrahlung

innerhalb einer einzelnen Iteration als Voraussetzung angenommen werden kann, zu finden.

7.1 Leistungsverlust im Emitter

Der maximale Leistungsoutput dieser Einheitszelle lässt sich mit $ABV_{mpp}J_{mpp}$ bestimmen. Der laterale spezifische Widerstandsverlust des Emitters lässt sich durch

$$\rho_{sheet} = \frac{1}{q\mu_e N_D} [\Omega cm] \quad (40)$$

ausdrücken, wobei q die Ladung eines Elektrons e^- , μ_e die Beweglichkeit eines Elektrons und N_D die Donatorkonzentration ist. Normiert man dies noch auf die Schichtdicke des Emitters t so erhält man den spezifischen Emitterschichtwiderstand ρ_{sheet} in Ω/\square .

$$\rho_{sheet} = \frac{1}{q\mu_e N_D t} \left[\frac{\Omega}{\square} \right] \quad (41)$$

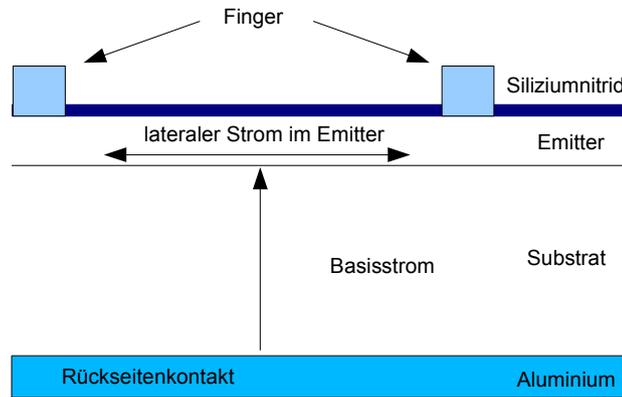


Abbildung 63: Querschnitt durch eine Solarzelle

Abbildung 63 zeigt den typischen Stromfluss innerhalb einer Solarzelle. Der Minoritätsträgerstrom fließt über die Raumladungszone in den Emitter und von dort lateral zum nächstgelegenen Finger. Nach Abbildung 64 kann der durch den Emittterwiderstand und den lateralen Strom hervorgerufene Leistungsverlust im Emitter durch aufsummieren von infinitesimalen Teilstücken dP ausgedrückt werden. Der Leistungsverlust im Abschnitt dy ergibt sich zu

$$d(P_{emitter}) = I^2 dR \quad (42)$$

Da der Strom I im Abstand $y = s/2$ von den Fingern Null ist und bis zu seinem Maximum bei $y = 0$ bzw. $y = s$ zunimmt kann man diesen über seine maximale Stromdichte J (bei homogener Bestrahlung) folgend ausdrücken:

$$I(y) = Jbs/2 \quad (43)$$

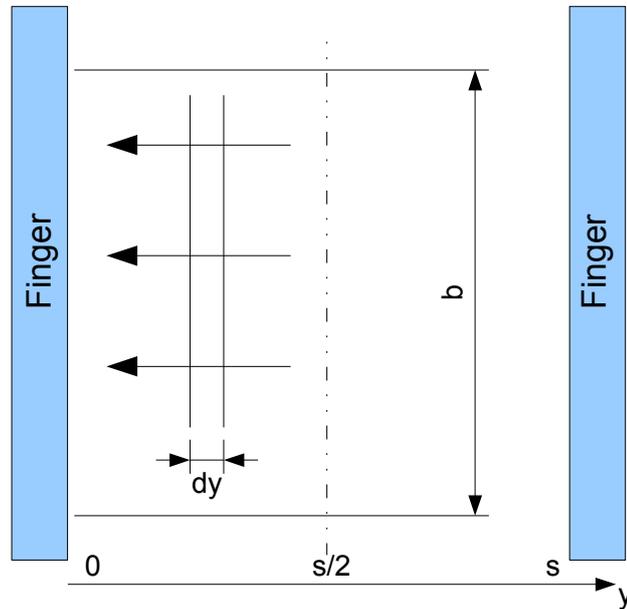


Abbildung 64: Ausschnitt einer Einheitszelle

Der für den Abstand dy zugehörige Widerstand dR ist

$$dR = \frac{\rho_{sheet} dy}{b} \quad (44)$$

Setzt man dies in Gleichung 42 ein, ergibt sich:

$$dP = (jby)^2 \frac{\rho_{sheet}}{b} dy$$

Der gesamte Leistungsverlust $dP_{emitter}$ wird durch Integration über alle Teilstücke dP von $y = 0$ bis $y = s/2$ berechnet

$$\begin{aligned} P_{emitter} &= \int I^2 dR \\ &= \int_0^{s/2} \frac{s^2 b^2 y^2 \rho_{sheet}}{b} dy \\ &= \frac{1}{24} s^3 j^2 b \rho_{sheet} \end{aligned} \quad (45)$$

Die für die Fläche $bs/2$ erzeugte Leistung im Arbeitspunkt (Maximum Power Point) entspricht

$$P_{mpp} = \frac{1}{2} bs V_{mpp} I_{mpp}. \quad (46)$$

Der partielle Leistungsverlust ergibt sich dadurch zu

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{P_{emitter}}{P_{mpp}} \\
 &= \frac{\frac{1}{24} s^3 j^2 b \rho_{sheet}}{\frac{1}{2} b s V_{mpp} I_{mpp}} \\
 &= \frac{\rho_{sheet} s^2 J_{mpp}}{12 V_{mpp}} \quad (47)
 \end{aligned}$$

7.2 Elektrischer Leistungsverlust in den Fingern

Unter der Annahme, dass der gesamte Strom für den ein einzelner Finger *zuständig* ist (d.h. lateral im Emitter in den Finger fließt) gilt für den Leistungsverlust in diesem

$$\begin{aligned}
 d(P_f) &= I^2 dR \\
 &= (J_{mpp} s x)^2 \left(\frac{\rho_{sheet, finger}}{W_f B} dx \right) \quad (48)
 \end{aligned}$$

Durch Integration erhält man

$$P_f = \frac{1}{3 W_f} B^3 s^2 J_{mpp}^2 \rho_{sheet, finger} \quad (49)$$

Für A/s Finger innerhalb einer Einheitszelle ergibt sich

$$P_{fn} = \frac{\alpha_f}{W_f} \quad (50)$$

mit

$$\alpha_f = \frac{1}{3} A B^3 s J_{mpp}^2 \rho_{sheet, finger} \quad (51)$$

7.3 Elektrischer Leistungsverlust in den Busbars

Gleichermassen gilt für etwaige rechteckige Busbars (die Verjüngung an den Enden bei BCE wird vernachlässigt)

$$P_B = \frac{\alpha_B}{W_B} \quad (52)$$

mit

$$\alpha_B = \frac{1}{3 W_B} A^3 B^2 J_{mpp}^2 \rho_{sheet, busbar} \quad (53)$$

7.4 Abschattungsverluste der Metallisierung

Abschattungsverluste der Metallisierung pro Zellfläche lassen sich durch die Stromdichte im MPP und die Metallisierungsfläche ausdrücken. Für die Busbar pro Einheitszelle gilt

$$P_{Bshading} = J_{mpp} V_{mpp} A W_B = \beta_B W_B, \quad (54)$$

respektive für die Finger pro Einheitszelle

$$P_{fshading} = J_{mpp} V_{mpp} \frac{nB}{s} W_f = \beta_f W_f. \quad (55)$$

7.5 Leistungsverlust der Metallisierung

Der gesamte Leistungsverlust von Metallisierung und Abschattung von Fingern bzw. Busbars ist demnach

$$P = \alpha/W + \beta W \quad (56)$$

abgeleitet nach W ergibt

$$P' = -\alpha \frac{1}{W^2} + \beta \quad (57)$$

nullgesetzt ergibt sich daraus die optimale Finger bzw. Busbarbreite

$$W_{min} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (58)$$

Rückeinsetzen in Gleichung 56 ergibt den minimalen Leistungsverlust (siehe Gleichung 59) bezogen auf optimale Finger- und Busbarbreiten.

$$\begin{aligned} P_{min} &= \alpha/W_{min} + \beta W_{min} \\ &= \alpha/\sqrt{\alpha/\beta} + \beta\sqrt{\alpha/\beta} \\ &= \alpha\alpha^{-1/2}\beta^{1/2} + \beta\alpha^{1/2}\beta^{-1/2} \\ &= \alpha^{1/2}\beta^{1/2} + \alpha^{1/2}\beta^{1/2} \\ &= 2\sqrt{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (59)$$

Setzt man α und β in den Gleichungen 58 und 59 ein ergeben sich die für den rekursiven Optimierungsprozess maßgeblichen Gleichungen, die in Tabelle 9 gegenübergestellt sind.

Tabelle 9: Gegenüberstellung der optimalen Strukturbreiten W_{min} und zugehörigen Leistungsverluste P_{min} von Fingern und Busbars

	W_{min}	P_{min}
Metallisierungsart		
Busbar	$AB \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\rho_{sheet} J_{mpp}}{V_{mpp}}}$	$A^2 B \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\rho_{sheet} V_{mpp} J_{mpp}^3}$
Finger	$sB \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\rho_{sheet} J_{mpp}}{V_{mpp}}}$	$AB^2 \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\rho_{sheet} V_{mpp} J_{mpp}^3}$

7.6 Ergebnis Vorderseitenoptimierung

Bevor man die theoretischen Betrachtungen übernehmen kann, müssen Linien- und Kontaktwiderstand, als auch Finger und Busbarbreiten bestimmt werden. In Kapitel 6 wurde ausführlich auf die Bestimmung der maßgeblichen Widerstände eingegangen. Für die Fingerbreiten muss man allerdings 2 Fälle unterscheiden. Für die Abschattung spielt das *Bleeding* eine wesentliche Rolle, für die elektrisch aktive Kontaktfläche hat es keine maßgebliche Auswirkung. Die Busbarbreiten sind aufgrund kundenspezifischer Kriterien fixiert.

Als theoretisch, optimales Ergebnis lässt sich in Abhängigkeit vom Emitterschichtwiderstand das in Tabelle 11 angegebene Optimum für die Fingeranzahl finden. Die für die Berechnung verwendeten Optimierungsparameter sind in Tabelle 10 aufgelistet.

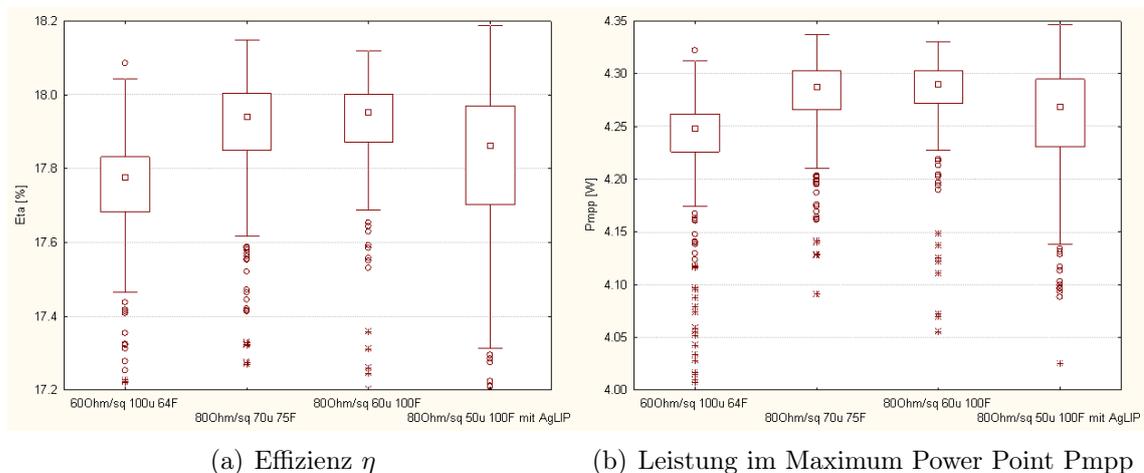
Tabelle 10: Optimierungsparameter für 80 μ m und 100 μ m breite Finger

$\mathbf{W}_{Fnominell}$	100 μ m	80 μ m
A [μ m]	156	156
B [μ m]	39	39
W_F [μ m]	130	112
W_B [mm]	2,05	2,05
J_{mpp} [mA/cm ²]	3,44	3,44
V_{mpp} [V]	0,514	0,514
R_{line} [Ω /cm]	0,136	0,179
ρ_{smf} [Ω /sq]	1,4	1,5
ρ_{smb} [m Ω /sq]	0,453	0,489
ρ_c [m Ω cm ²]	8,11 (80 Ω /□)	11,65 (90 Ω /□)

Tabelle 11: Optimale Fingeranzahl in Abhängigkeit vom Emitterschichtwiderstand und Fingerbreite

Emitterwiderstand	Fingerbreite	Fingeranzahl
$80\Omega/\square$	$80\mu\text{m}$	76
	$100\mu\text{m}$	70
$90\Omega/\square$	$80\mu\text{m}$	80
	$100\mu\text{m}$	74

Exemplarisch wurde in den Abbildungen 65, 66 und 67 das Ergebnis von 4 verschiedenen Vorderseitenoptimierungen gegenübergestellt. Einerseits sieht man deutlich den positiven Einfluß des hochohmigen Emitters gegenüber der Baseline ($60\Omega/\square$, $100\mu\text{m}$ Fingerbreite und 64 Fingern), sowohl im Kurzschlussstrom (höhere Lichtempfindlichkeit bei kurzen Wellenlängen), als auch in der Leerlaufspannung (verringerten Sättigungssperrstrom im Emitter; gesteigerter Kurzschlussstrom), aber auch den negativen Einfluss im Serienwiderstand aufgrund von höherem Kontaktwiderstand und erhöhtem lateralem Emitterschichtwiderstand.

Abbildung 65: Wirkungsgrad η und Leistung P_{mpp} im Vergleich

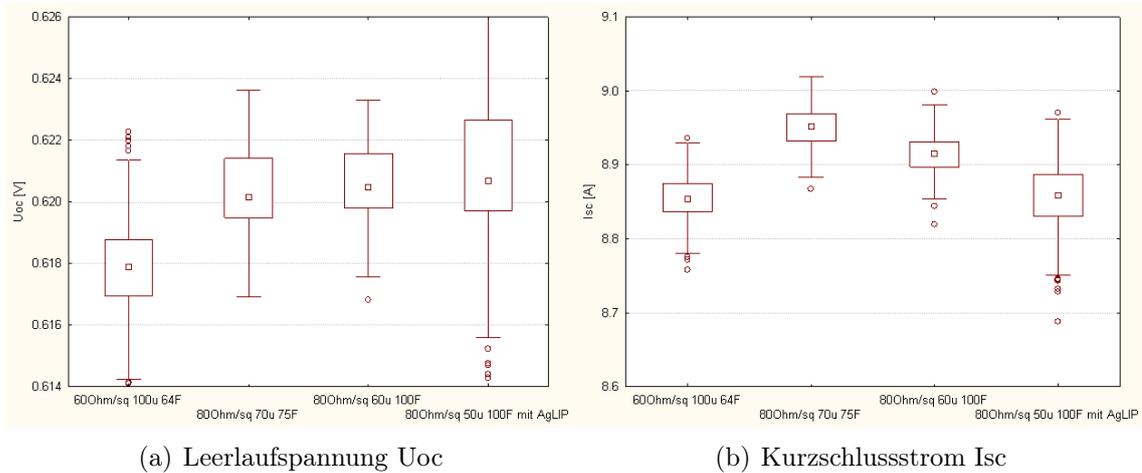


Abbildung 66: Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} im Vergleich

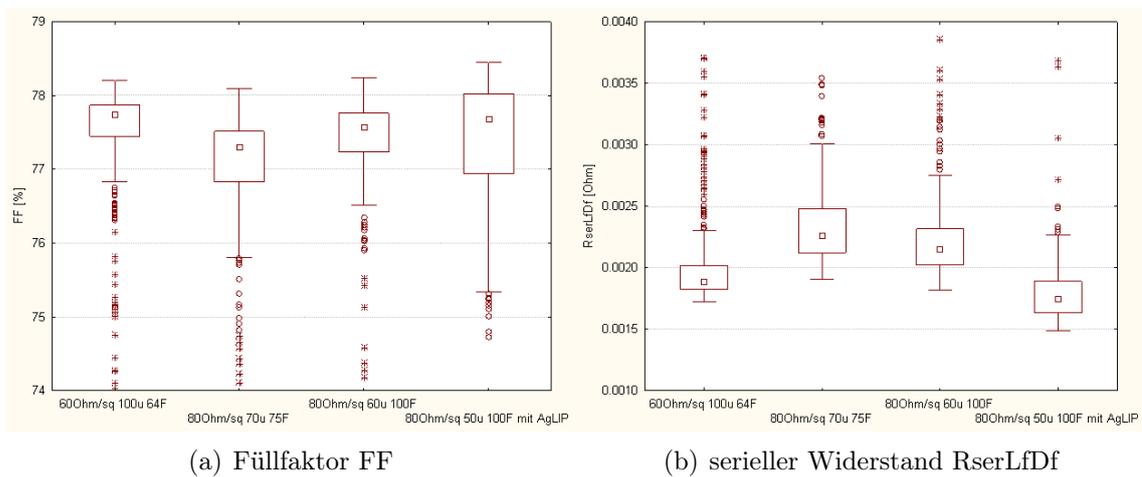


Abbildung 67: Füllfaktor FF und serieller Widerstand R_{serLdF} im Vergleich

8 Ergebnisse und Ausblick

Meine Diplomarbeit beschäftigte sich im ersten Arbeitspaket damit, einen Offline Solarsimulator aufzubauen und laut Norm IEC 60904-x in Betrieb zu nehmen. Dies umfasst den mechanischen und elektrischen Aufbau einerseits (Kapitel 4.3), wie aber auch die Implementierung von geeigneten Algorithmen zur Parameterextraktion von Solarzellen (Kapitel 4.5). Eine ausgedehnte Zuverlässigkeitsuntersuchung dieser Parameter führte zur produktionsbegleitend und -unterstützenden Einführung des Messmittels (Kapitel 4.7). Sowohl für tagtägliche Kalibrationsanwendungen (Kapitel 4.4) für den *inline*-Zelltester, als auch für Untersuchungen von parasitären Zelleigenschaften (Kapitel 4.5), Temperaturkoeffizienten (Kapitel 4.6) und Wiederholbarkeits-, Nachvollziehbarkeits-, Stabilitäts-, Linearitätsuntersuchungen über längere Zeiträume (Kapitel 5) wurde der Simulator evaluiert. Seine Eigenschaft als hochgenaues Messmittel wurde unter anderem dafür angewendet um die Auswirkungen der Eigenschaften des pn-Übergangs auf verschiedenste Prozessänderungen sichtbar zu machen (Kapitel 4.5.2). Die Messroutinen wurden so implementiert, dass eine nahezu automatische Parameterextraktion der wichtigsten Kenngrößen durchgeführt wird.

Im zweiten Arbeitspaket wurden die Eigenschaften der Vorderseitenmetallisierung im Detail untersucht. Linienwiderstandsmessungen wurden durchgeführt um die Leitfähigkeit der Vorderseitenmetallisierung in Abhängigkeit von Druckparametern, Pasten und Sieben zu betrachten (Kapitel 6.6.1). Kontaktwiderstandsmessungen zeigten den Einfluss des darunterliegenden Emitters (und damit die Diffusionsprozesseigenschaften) einerseits, aber auch die, für die Kontaktbildung maßgeblichen, *firing conditions* (Kapitel 6.6.2). Die dafür verwendeten *Transfer-Length Method (TLM)* Strukturen wurden reevaluiert und eine geeignetere Struktur entworfen (Kapitel 6.6.3). Die dadurch gewonnen Ergebnisse wurden dafür genutzt um eine neue Vorderseitenmetallisierung zu entwerfen (Kapitel 7), die in Abhängigkeit von Emitterschichtwiderstand, Linienbreiten und *firing conditions* einen signifikanten Zuwachs in Zellwirkungsgrad ermöglichte (Kapitel 7.6).

Literatur

- [1] Einstein, Albert *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* Die Lichtquantenhypothese, Annalen der Physik, 1905, Band 17, Seite 132ff <http://www.zbp.univie.ac.at/dokumente/einstein1.pdf> Zugang am 20.10.2016
- [2] Matzer R. et al *Ökobilanzierung in der Photovoltaik Durchführung am Beispiel eines Konzentratorsystems (2010)*
- [3] EPIA (European Photovoltaic Industry Association) *EPIA - Solar Generation 6 2011 Full Report* http://pvtrin.eu/assets/media/PDF/Publications/Other%20Publications/36.SolarGeneration6__2011.pdf Zugang am 20.10.2016
- [4] Wagemann, H.G. *Lehrbuch der Experimentalphysik* Band 6, Festkörper, Berlin, 1992
- [5] Lemmer Uli *Vorlesungsunterlagen zur Vorlesung Solarenergie aus dem Jahre 2008 des LTI des Karlsruher Insitut für Technologie* http://www.lti.uni-karlsruhe.de/rd_download/Solarenergie_20081104_Kristalline_pn_Zellen.pdf Zugang am 20.10.2016
- [6] Fiegl, G.F. et al *Low Cost Monocrystalline Silicon Sheet Fabrication for Solar Cells by Advanced Ingot Technology* Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980, p. 303ff
- [7] Markvart, Tom, Castaner, Luis *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation* p. ISBN-13: 978-1-85617-457-1
- [8] IEC *Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data* Edition 2, 2008
- [9] Balenzategui, J.L. et al *Calibration of Crystalline Silicon Solar Cells as Reference Devices for Cell Testers and Sorters* 25th EU Photovoltaic Energy Conference, Valencia, 2010
- [10] *Analyse und Verbesserung der rueckfuehrbaren Kalibrierung von Solarzellen* Dissertation an der Technischen Universitaet Braunschweig, 2004
- [11] Newport Oriel Instruments *Solar Simulation - Section Two - Features* <https://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/12298.pdf> Zugang am 20.10.2016

-
- [12] Mette Ansgar *New Concepts for Front Side Metallization of Industrial Silicon Solar Cells* Dissertation am Fraunhofer - Institut für Solare Energiesysteme
- [13] Green, Martin A. *Solar Cells - Operating Principles, Technology and System Applications* ISBN 0-13-82270
- [14] Aberle, A.G. et al *Proceedings of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Louisville, Kentucky, USA, 1993, p.133
- [15] Dietrich, Edgar *Leitfaden zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen* Q-DAS GmbH, 2002
- [16] Dicker J. et al *Dissertation* Universität Konstanz, Deutschland, 2003, p.129
- [17] Schottky W. *Semiconductor Theory of the Blocking Layer* Naturwissenschaften 26, 1938, p.843
- [18] Schroder, Dieter K. *Semiconductor Material and Device Characterization, 3rd Edition* ISBN-10: 0-471-73906-5, 2006, p. 128ff
- [19] Mönch W. *On the Physics of Metal-Semiconductor Interfaces* Reports on Progress in Physics 53, 1990, p. 221ff
- [20] Crowel, C. R. et al *Normalized Thermionic-Field (TF) Emission in Metal-Semiconductor (Schottky) Barriers* Solid-State Electron. 12, 1969, p. 89ff
- [21] Berger, H.H. *Models for Contacts to Planar Devices* Solid-State Electron. 15, 1972 , p. 145ff
- [22] Swirhun, S.E. et al *Current Crowding Effects and Determination of Specific Contact Resistivity from Contact End Resistance (CER) Measurements* IEEE Electron Dev. Lett. EDL-6, 1985, p. 639ff
- [23] Mazer, J.A. et al *An Improved Test Structure and Kelvin- Measurement Method for the Determination of Integrated Circuit Front Contact Resistance* J. Electrochem. Soc. 132, 1985, p. 440ff
- [24] Green, Martin A. *Solar Cells - Operating Principles, Technology and System Applications* p. 153ff ISBN 0-13-82270
- [25] Sereeze, H.B. et al *Optimizing Solar Cell Performance by Simultaneous Consideration of Grid Pattern Design and Interconnect Configurations* Conference Record, 13¹³ IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington D.C. 1978, p. 609ff

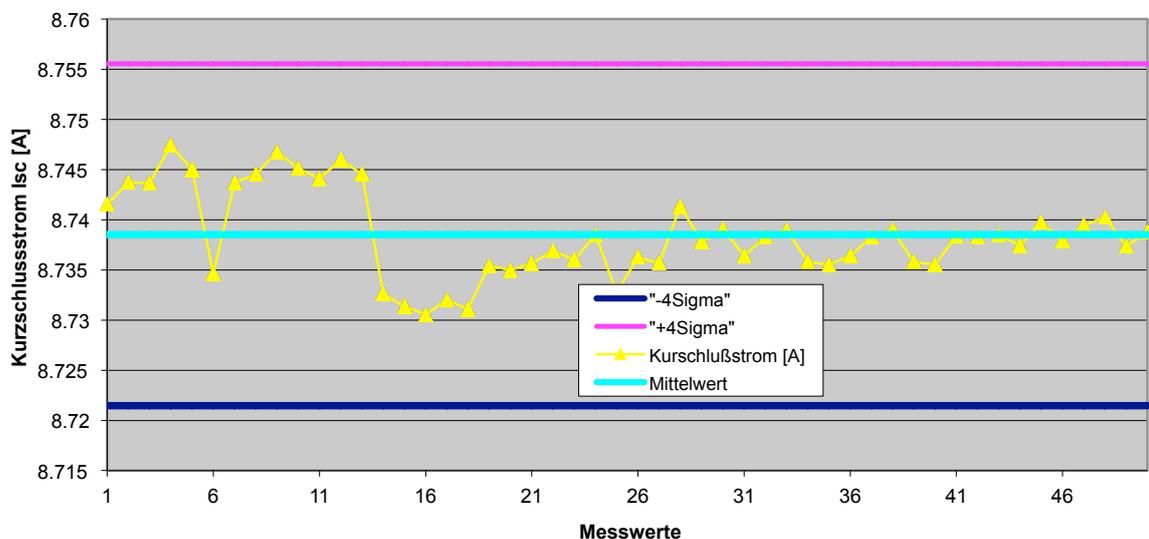
- [26] Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1) *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* 2008, p. 7

9 Anhang

9.1 Messmittelanalyse nach Verfahren 1

Messmittelfähigkeitsuntersuchung (Verfahren 1)

Bezeichnung Solarsimulator	Hersteller Newport/MB	Baujahr 2010	Standort Physik Labor
Geräteangaben	Skalenwert: Skw=	2.00E-02	
	Messbereich: MB=	1-20	
	Auflösung in %:	$\frac{Skw}{T} \cdot 100\% = 5.88\%$	
Werkstück		Maßverkörperung:	
Benennung: fertig prozessierte Solarzelle		Benennung: Kurzschlußstrom [A]	
Merkmal/Toleranz T= 0.340		Istwert $x_r=8.7400$	
Messbedingungen: Maßeinheit aller Mess- und Auswertegrößen: A			
Das Messgerät wurde mit einer "golden cell" kalibriert. Anschließend wurde eine von der "golden cell" unterschiedliche golden cell verwendet um mit Neukontaktierung den Wafer 50 mal zu vermessen. Als "Istwert" wurde der vom Fraunhofer ISE bestimmte Messwertes verwendet.			

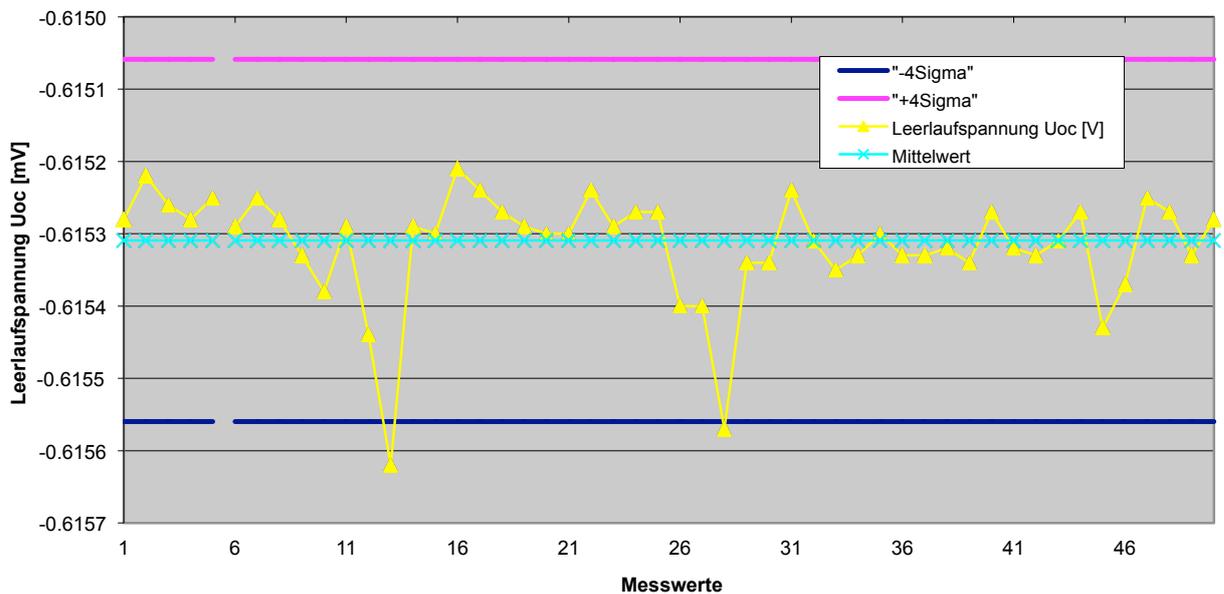


Messwerte x_i	1	2	3	4	5
1	8.742	8.744	8.744	8.747	8.745
2	8.735	8.744	8.745	8.747	8.745
3	8.744	8.746	8.745	8.733	8.731
4	8.731	8.732	8.731	8.735	8.735
5	8.735	8.736	8.737	8.739	8.738
6	8.736	8.737	8.736	8.739	8.733
7	8.736	8.736	8.741	8.738	8.739
8	8.736	8.738	8.739	8.736	8.736
9	8.738	8.738	8.738	8.737	8.740
10	8.738	8.739	8.740	8.737	8.739

Messmittelfähigkeitsuntersuchung (Verfahren 1)

Auswertung	
Mittelwert \bar{x}	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 8.7385$
Standardabweichung s_w	$s_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.004258173$
systematische Messabweichung B_i	$B_i = \bar{x} - x_r = -0.0014984$
Fähigkeitskennzahl C_g	$C_g = \frac{0,1 \cdot T}{4 \cdot s_w} = 2.00$
kritische Fähigkeitskennzahl C_{gk}	$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - \bar{x} - x_r }{4 s_w} = 1.91$
kleinste Toleranz, für die das Messmittel noch fähig ist:	$T_{\min} = \frac{(C_{gk} \cdot 4s_w + \bar{x} - x_r)}{0,1} = 0.340$
Beurteilung des Messmittels (cg, cgk > 1,33: Messmittel ist fähig)	
$C_g = 2.00$ $C_{gk} = 1.91$	Ergebnis: Das Messmittel ist fähig!

Bezeichnung Solarsimulator	Hersteller Newport/MB	Baujahr 2010	Standort Physik Labor
Geräteangaben	Skalenwert: Skw=	0.002	
	Messbereich: MB=	1-2	
	Auflösung in %:	$\frac{Skw}{T} \cdot 100\% =$	55.56%
Werkstück		Maßverkörperung:	
Benennung: fertig prozessierter Wafer	Benennung: Leerlaufspannung Uoc [V]		
Merkmal/Toleranz T= 0.004	Istwert $x_i=0.6153$		
Messbedingungen: Maßeinheit aller Mess- und Auswertgrößen: V			
Das Messgerät wurde mit einer "golden cell" kalibriert. Anschließend wurde eine von der "golden cell" unterschiedliche golden cell verwendet um mit Neukontaktierung den Wafer 50 zu vermessen. Als "Istwert" wurde der vom Fraunhofer ISE bestimmten Messwertes verwendet.			



Messwerte x_i	1	2	3	4	5
1	-0.61528	-0.61522	-0.61526	-0.61528	-0.61525
2	-0.61529	-0.61525	-0.61528	-0.61533	-0.61538
3	-0.61529	-0.61544	-0.61531	-0.61529	-0.61530
4	-0.61521	-0.61524	-0.61527	-0.61529	-0.61530
5	-0.61530	-0.61524	-0.61529	-0.61527	-0.61527
6	-0.61540	-0.61540	-0.61557	-0.61534	-0.61534
7	-0.61524	-0.61531	-0.61535	-0.61533	-0.61530
8	-0.61533	-0.61533	-0.61532	-0.61534	-0.61527
9	-0.61532	-0.61533	-0.61531	-0.61527	-0.61543
10	-0.61537	-0.61525	-0.61527	-0.61533	-0.61528

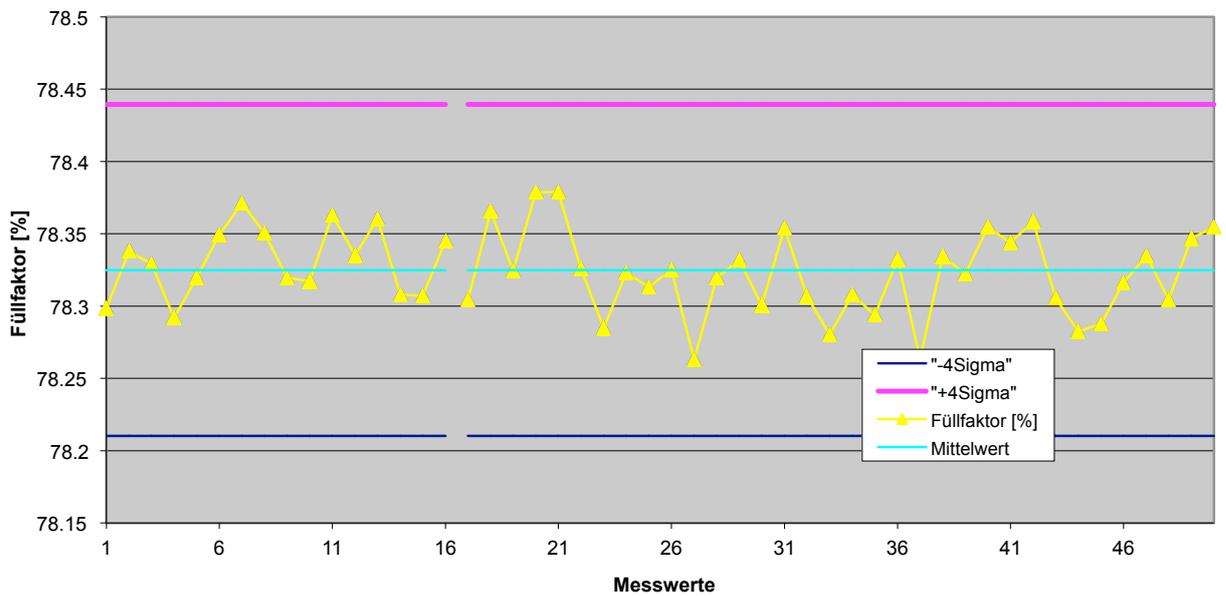
Auswertung	
Mittelwert \bar{x}	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = -0.6153$
Standardabweichung s_w	$s_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 6.26242E-05$
systematische Messabweichung B_i	$B_i = \bar{x} - x_r = -9.2E-06$
Fähigkeitskennzahl C_g	$C_g = \frac{0,1 \cdot T}{4 \cdot s_w} = 1.44$
kritische Fähigkeitskennzahl C_{gk}	$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - \bar{x} - x_r }{4 s_w} = 1.40$
kleinste Toleranz, für die das Messmittel noch fähig:	$T_{\min} = \frac{(C_{gk} \cdot 4s_w + \bar{x} - x_r)}{0,1} = 0.004$
Beurteilung des Messmittels (cg, cgk > 1,33: Messmittel ist fähig)	
$C_g = 1.44$ $C_{gk} = 1.40$	Ergebnis: Das Messmittel ist fähig!

Bezeichnung Solarsimulator	Hersteller Newport/MB	Baujahr 2010	Standort Physik Labor
--------------------------------------	---------------------------------	------------------------	---------------------------------

Geräteangaben	Skalenwert: Skw=	
	Messbereich: MB=	
	Auflösung in %:	$\frac{Skw}{T} \cdot 100\% = 0.00\%$

Werkstück	Maßverkörperung:
Benennung: fertig prozessierter Wafer	Benennung: Füllfaktor [%]
Merkmal/Toleranz T= 1.02	Istwert $x_i=78.43$

Messbedingungen: Maßeinheit aller Mess- und Auswertgrößen: %
 Das Messgerät wurde mit einer "golden cell" kalibriert. Anschließend wurde eine von der "golden cell" unterschiedliche golden cell verwendet um mit Neukontaktierung den Wafer 50 zu vermessen. Als "Istwert" wurde der vom Fraunhofer ISE bestimmten Messwertes verwendet.



Messwerte x_i	1	2	3	4	5
1	78.30	78.34	78.33	78.29	78.32
2	78.35	78.37	78.35	78.32	78.32
3	78.36	78.35	78.36	78.31	78.31
4	78.35	78.30	78.37	78.32	78.38
5	78.38	78.33	78.28	78.32	78.31
6	78.33	78.26	78.32	78.33	78.30
7	78.35	78.31	78.28	78.31	78.29
8	78.33	78.26	78.33	78.32	78.35
9	78.34	78.36	78.31	78.28	78.29
10	78.32	78.33	78.30	78.35	78.35

Auswertung	
Mittelwert \bar{x}	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 78.3248$
Standardabweichung s_w	$s_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.028651086$
systematische Messabweichung B_i	$B_i = \bar{x} - x_r = -0.1051624$
Fähigkeitskennzahl C_g	$C_g = \frac{0,1 \cdot T}{4 \cdot s_w} = 0.89$
kritische Fähigkeitskennzahl C_{gk}	$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - \bar{x} - x_r }{4 s_w} = -0.03$
kleinste Toleranz, für die das Messmittel noch fähig:	$T_{\min} = \frac{(C_{gk} \cdot 4s_w + \bar{x} - x_r)}{0,1} = 2.58$
Beurteilung des Messmittels (cg, cgk > 1,33: Messmittel ist fähig)	
$C_g = 0.89$ $C_{gk} = -0.03$	Ergebnis: Das Messmittel ist nicht fähig!

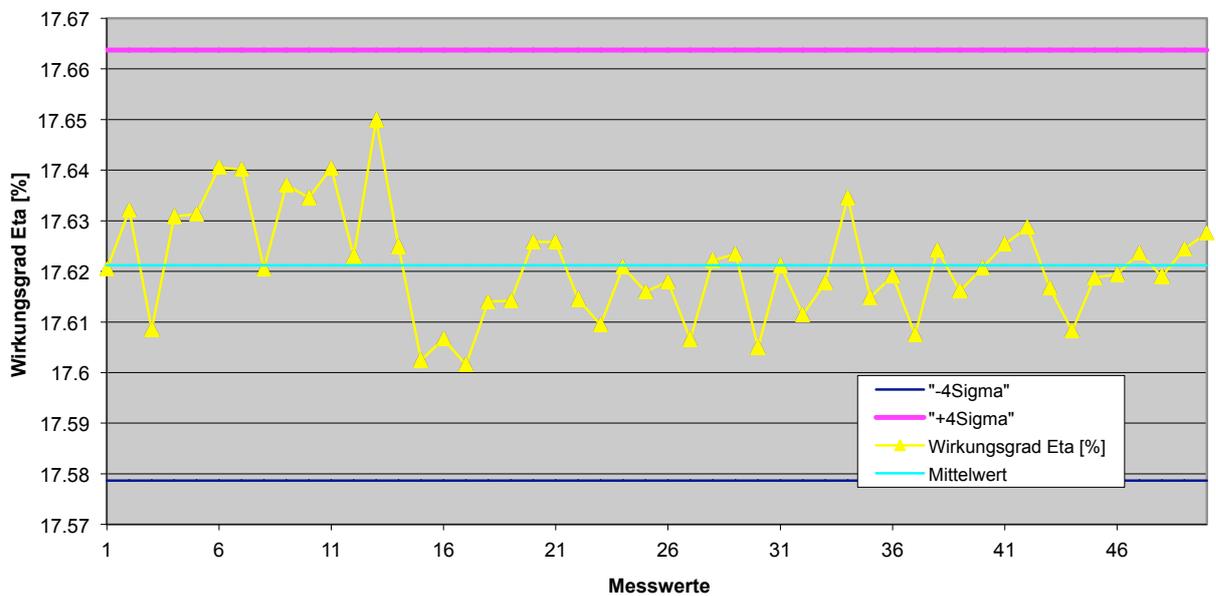
Messmittelfähigkeitsuntersuchung (Verfahren 1)

Bezeichnung Solarsimulator	Hersteller Newport/MB	Baujahr 2009/2010	Standort Physik Labor
--------------------------------------	---------------------------------	-----------------------------	---------------------------------

Geräteangaben	Skalenwert: Skw=		
	Messbereich: MB=		
	Auflösung in %:	$\frac{Skw}{T} \cdot 100\% =$	0.00%

Werkstück	Maßverkörperung:
Benennung: fertig prozessierter Wafer	Benennung: Wirkungsgrad Eta [%]
Merkmal/Toleranz T= 0.700	Istwert $x_r=17.6300$

Messbedingungen: Maßeinheit aller Mess- und Auswertegrößen: %
 Das Messgerät wurde kalibriert. Anschließend wurde ein postPSG-Wafer 50 mal vermessen.
 Der Wafer wurde aus der laufenden Produktion nach der PSG entnommen. Als "Istwert" wurde der Messwert des am QuadPro vermessenen Wafers (25 Punkte) verwendet.



Messwerte x_i	1	2	3	4	5
1	17.62039	17.63209	17.60851	17.63081	17.6313
2	17.64052	17.64013	17.62053	17.63709	17.63455
3	17.64041	17.62295	17.64995	17.62491	17.60248
4	17.60662	17.6015	17.614	17.61418	17.62582
5	17.62582	17.61448	17.60941	17.62086	17.61598
6	17.61794	17.60655	17.62216	17.62343	17.60494
7	17.62119	17.61143	17.61777	17.63455	17.61485
8	17.61912	17.60745	17.62426	17.61605	17.62069
9	17.62535	17.62866	17.61673	17.60823	17.61875
10	17.61944	17.62361	17.61901	17.62441	17.62758

Messmittelfähigkeitsuntersuchung (Verfahren 1)

Auswertung	
Mittelwert \bar{x}	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 17.6212$
Standardabweichung s_w	$s_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.010631954$
systematische Messabweichung B_i	$B_i = \bar{x} - x_r = -0.0088112$
Fähigkeitskennzahl C_g	$C_g = \frac{0,1 \cdot T}{4 \cdot s_w} = 1.65$
kritische Fähigkeitskennzahl C_{gk}	$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - \bar{x} - x_r }{4 s_w} = 1.44$
kleinste Toleranz, für die das Messmittel noch fähig:	$T_{\min} = \frac{(C_{gk} \cdot 4s_w + \bar{x} - x_r)}{0,1} = 0.700$
Beurteilung des Messmittels (cg, cgk > 1,33: Messmittel ist fähig)	
$C_g = 1.65$ $C_{gk} = 1.44$	Ergebnis: Das Messmittel ist fähig!

9.2 Messmittelanalyse nach Verfahren 2

Messmittelfähigkeitsuntersuchung (Verfahren 2)
Repeatability and Reproducibility-Study

	Bezeichnung Solarsimulator	Hersteller Newport/MB	Baujahr 2010	Standort Physik Labor
Geräteangaben	Skalenwert: Skw= 0.0001	Messbedingungen: Es wurden 4 von der Kalibrierzelle unterschiedliche "golden cells" von 3 verschiedenen Personen vermessen.	Maßeinheit aller Mess- und Auswertgrößen: A	
	Messbereich: MB= 0-50%			
Auflösung in %: $\frac{Skw}{T} \cdot 100\% = 0.03\%$				

Das Verfahren 2 ist zulässig, da die Forderungen an das Verfahren 1 (Cgk und Cg >= 1,33) erfüllt sind!

Teil	Prüfer 1 Name: A					Prüfer 2 Name: B					Prüfer 3 Name: C				
	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _A	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _B	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _C
1	8.756	8.754	8.757	8.742	0.01454	8.749	8.739	8.754	8.743	0.01552	8.736	8.739	8.754	8.752	0.01875
2	8.985	8.992	8.972	8.992	0.0204	8.982	8.978	8.971	8.988	0.017	9.018	8.991	9.028	9.016	0.037
3	8.741	8.739	8.737	8.746	0.00847	8.738	8.734	8.737	8.735	0.00433	8.741	8.729	8.736	8.739	0.01219
	$\bar{x}_A = 8.82608167$				$\bar{R}_A = 0.01447$	$\bar{x}_B = 8.82066583$				$\bar{R}_B = 0.01228$	$\bar{x}_C = 8.83168833$				$\bar{R}_C = 0.02265$

Auswertung nach der R-Methode					
Gesamtmittelwert	$\bar{x} = (\bar{x}_A + \bar{x}_B + \bar{x}_C) / 3 =$	8.82614528	Spannweitenmittelwert	$\bar{R} = (\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C) / 3 =$	0.016467
systematische Messabweichung	$B_i = \bar{x} - x_r =$	0.08614528	Mittelwertdifferenz	$\bar{x}_{diff} = \max\{\bar{x}_A; \bar{x}_B; \bar{x}_C\} - \min\{\bar{x}_A; \bar{x}_B; \bar{x}_C\} =$	0.011022
Anzahl der Varianten	3				
Anzahl der Messreihen	4				

Ermittlung des Gesamtstrebereiches			
Auswahl des Vertrauensniveaus 1=95% 2=99% 3=99,73%	3		
Vertrauensniveau=	99,73%		
Wiederholpräzision (Repeatability)	$W = \bar{R} \cdot K_1 =$	0.04798446	$\%W = 100 \cdot W/T = 14.1\%$
Vergleichspräzision (Reproducibility)	$V = \bar{x}_{diff} \cdot K_2 =$	0.03461065	$\%V = 100 \cdot V/T = 10.2\%$
Gesamtstrebereich	$R \& R = \sqrt{W^2 + V^2} =$	0.05916422	$\%R\&R = 100 \cdot R\&R/T = 17.4\%$

Beurteilung des Messprozesses				Ergebnis
Kriterien:				Der Messprozess ist geeignet!
relativer Gesamtstrebereich (Toleranzausnutzung)	0% < %R&R ≤ 20%	20% < %R&R ≤ 30%	%R&R > 30%	
Messprozess	geeignet	bedingt geeignet	ungeeignet	

Messmittelfähigkeitsuntersuchung (Verfahren 2)
Repeatability and Reproducibility-Study

	Bezeichnung Solarsimulator	Hersteller Newport/MB	Baujahr 2010	Standort Physik Labor
Geräteangaben	Skalenwert: Skw= 0.001	Messbedingungen: Es wurden 4 von der Kalibrierzelle unterschiedliche "golden cells" von 3 verschiedenen Personen vermessen.	Maßeinheit aller Mess- und Auswertgrößen: A	
	Messbereich: MB= 0-50%			
Auflösung in %: $\frac{Skw}{T} \cdot 100\% = 0.29\%$				

Das Verfahren 2 ist zulässig, da die Forderungen an das Verfahren 1 (Cgk und Cg >= 1,33) erfüllt sind!

Teil	Prüfer 1 Name: A					Prüfer 2 Name: B					Prüfer 3 Name: C				
	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _A	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _B	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _C
1	-0.6154	-0.6155	-0.6154	-0.6157	0.00023	-0.6154	-0.6155	-0.6155	-0.6155	0.00012	-0.6153	-0.6154	-0.6154	-0.6157	0.00032
2	-0.6154	-0.6155	-0.6163	-0.6163	0.00086	-0.6162	-0.6161	-0.6157	-0.6162	0.00051	-0.6163	-0.6163	-0.6162	-0.6162	9E-05
3	-0.6147	-0.6147	-0.6147	-0.6149	0.00018	-0.6147	-0.6146	-0.6146	-0.6146	0.00012	-0.6148	-0.6148	-0.6148	-0.6150	0.00023
	$\bar{x}_A = -0.61536833$				$\bar{R}_A = 0.00042$	$\bar{x}_B = -0.61538583$				$\bar{R}_B = 0.00025$	$\bar{x}_C = -0.61551583$				$\bar{R}_C = 0.00021$

Auswertung nach der R-Methode					
Gesamtmittelwert	$\bar{x} = (\bar{x}_A + \bar{x}_B + \bar{x}_C) / 3 =$	-0.61542333	Spannweitenmittelwert	$\bar{R} = (\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C) / 3 =$	0.000296
systematische Messabweichung	$Bi = \bar{x} - x_r =$	-9.35542333	Mittelwertdifferenz	$\bar{x}_{diff} = \max\{\bar{x}_A; \bar{x}_B; \bar{x}_C\} - \min\{\bar{x}_A; \bar{x}_B; \bar{x}_C\} =$	0.000148
Anzahl der Varianten		3			
Anzahl der Messreihen		4			

Ermittlung des Gesamtstrebereiches			
Auswahl des Vertrauensniveaus 1=95% 2=99% 3=99,73%			3
Vertrauensniveau=			99,73%
Wiederholpräzision (Repeatability)	$W = \bar{R} \cdot K_1 =$	0.00086126	$\%W = 100 \cdot W/T = 0.3\%$
Vergleichspräzision (Reproducibility)	$V = \bar{x}_{diff} \cdot K_2 =$	0.00046315	$\%V = 100 \cdot V/T = 0.1\%$
Gesamtstrebereich	$R \& R = \sqrt{W^2 + V^2} =$	0.00097789	$\%R\&R = 100 \cdot R\&R/T = 0.3\%$

Beurteilung des Messprozesses				Ergebnis
Kriterien:				
relativer Gesamtstrebereich (Toleranzausnutzung)	0% < %R&R ≤ 20%	20% < %R&R ≤ 30%	%R&R > 30%	Der Messprozess ist geeignet!
Messprozess	geeignet	bedingt geeignet	ungeeignet	

Messmittelfähigkeitsuntersuchung (Verfahren 2)
Repeatability and Reproducibility-Study

	Bezeichnung Solarsimulator	Hersteller Newport/MB	Baujahr 2010	Standort Physik Labor
Geräteangaben	Skalenwert: Skw= 0.02	Messbedingungen: Es wurden 4 von der Kalibrierzelle unterschiedliche "golden cells" von 3 verschiedenen Personen vermessen.	Maßeinheit aller Mess- und Auswertgrößen: A	
	Messbereich: MB= 0-50%			
	Auflösung in %: $\frac{Skw}{T} \cdot 100\% = 1.96\%$			

Das Verfahren 2 ist zulässig, da die Forderungen an das Verfahren 1 (Cgk und Cg >= 1,33) erfüllt sind!

Teil	Prüfer 1 Name: A					Prüfer 2 Name: B					Prüfer 3 Name: C				
	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _A	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _B	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _C
1	78.4440	78.3787	78.4210	78.3721	0.07193	78.2823	78.2649	78.2418	78.2452	0.04041	78.3517	78.3933	78.4392	78.3741	0.08749
2	77.9489	77.9363	78.0096	77.9651	0.07321	77.9773	78.0812	78.0821	77.9448	0.13729	77.9326	77.9845	77.9821	78.0284	0.09562
3	78.1256	78.0054	78.0700	78.1060	0.12025	78.1065	78.0912	78.1575	78.0221	0.13535	78.0246	77.9406	78.0774	78.0176	0.13681
	$\bar{x}_A = 78.1485606$				$\bar{R}_A = 0.08846$	$\bar{x}_B = 78.1247447$				$\bar{R}_B = 0.10435$	$\bar{x}_C = 78.1288492$				$\bar{R}_C = 0.10664$

Auswertung nach der R-Methode					
Gesamtmittelwert	$\bar{x} = (\bar{x}_A + \bar{x}_B + \bar{x}_C) / 3 =$	78.1340515	Spannweitenmittelwert	$\bar{R} = (\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C) / 3 =$	0.099818
systematische Messabweichung	$B_i = \bar{x} - x_r =$	69.3940515	Mittelwertdifferenz	$\bar{x}_{diff} = \max\{\bar{x}_A; \bar{x}_B; \bar{x}_C\} - \min\{\bar{x}_A; \bar{x}_B; \bar{x}_C\} =$	0.023816
Anzahl der Varianten		3			
Anzahl der Messreihen		4			

Ermittlung des Gesamtstrebereiches			
Auswahl des Vertrauensniveaus 1=95% 2=99% 3=99,73%			3
Vertrauensniveau=			99,73%
Wiederholpräzision (Repeatability)	$W = \bar{R} \cdot K_1 =$	0.29087259	$\%W = 100 \cdot W/T = 28.5\%$
Vergleichspräzision (Reproducibility)	$V = \bar{x}_{diff} \cdot K_2 =$	0.07478198	$\%V = 100 \cdot V/T = 7.3\%$
Gesamtstrebereich	$R \& R = \sqrt{W^2 + V^2} =$	0.30033183	$\%R\&R = 100 \cdot R\&R/T = 29.4\%$

Beurteilung des Messprozesses				Ergebnis
Kriterien:				
relativer Gesamtstrebereich (Toleranzausnutzung)	0% < %R&R ≤ 20%	20% < %R&R ≤ 30%	%R&R > 30%	Der Messprozess ist bedingt geeignet!
Messprozess	geeignet	bedingt geeignet	ungeeignet	

Messmittelfähigkeitsuntersuchung (Verfahren 2)
Repeatability and Reproducibility-Study

	Bezeichnung Solarsimulator	Hersteller Newport/MB	Baujahr 2010	Standort Physik Labor
Geräteangaben	Skalenwert:	Skw= 0.02	Messbedingungen: Es wurden 4 von der Kalibrierzelle unterschiedliche "golden cells" von 3 verschiedenen Personen vermessen.	
	Messbereich:	MB= 0-50%		
	Auflösung in %:	$\frac{Skw}{T} \cdot 100\% = 2.86\%$	Maßeinheit aller Mess- und Auswertgrößen: A	

Das Verfahren 2 ist zulässig, da die Forderungen an das Verfahren 1 (C_{gk} und C_g >= 1,33) erfüllt sind!

Teil	Prüfer 1 Name: A					Prüfer 2 Name: B					Prüfer 3 Name: C				
	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _A	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _B	Messreihe1	Messreihe2	Messreihe3	Messreihe4	R _C
1	17.7340	17.7123	17.7722	17.7491	0.05987	17.7626	17.6919	17.7066	17.6630	0.09954	17.6848	17.6823	17.7172	17.6701	0.04711
2	17.5114	17.5057	17.5016	17.4120	0.0994	17.5560	17.5712	17.5657	17.5785	0.02247	17.6146	17.6048	17.6035	17.5972	0.01738
3	17.6353	17.6173	17.6224	17.6334	0.01797	17.5937	17.5787	17.6240	17.6147	0.04521	17.6009	17.6059	17.6124	17.6145	0.0136
	$\bar{x}_A = 17.6172175$				$\bar{R}_A = 0.05908$	$\bar{x}_B = 17.6255408$				$\bar{R}_B = 0.05574$	$\bar{x}_C = 17.63403$				$\bar{R}_C = 0.02603$

Auswertung nach der R-Methode					
Gesamtmittelwert	$\bar{x} = (\bar{x}_A + \bar{x}_B + \bar{x}_C) / 3 =$	17.6255961	Spannweitenmittelwert	$\bar{R} = (\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C) / 3 =$	0.046950
systematische Messabweichung	$Bi = \bar{x} - x_T =$	8.88559611	Mittelwertdifferenz	$\bar{x}_{Dif} = \max\{\bar{x}_A; \bar{x}_B; \bar{x}_C\} - \min\{\bar{x}_A; \bar{x}_B; \bar{x}_C\} =$	0.016813
Anzahl der Varianten		3			
Anzahl der Messreihen		4			

Ermittlung des Gesamtstrebereiches			
Auswahl des Vertrauensniveaus 1=95% 2=99% 3=99,73%			3
Vertrauensniveau=			99.73%
Wiederholpräzision (Repeatability)	$W = \bar{R} \cdot K_1 =$	0.13681399	%W = 100*W/T = 19.5%
Vergleichspräzision (Reproducibility)	$V = \bar{x}_{Dif} \cdot K_2 =$	0.05279125	%V = 100*V/T = 7.5%
Gesamtstrebereich	$R \& R = \sqrt{W^2 + V^2} =$	0.14664577	%R&R = 100*R&R/T = 20.9%

Beurteilung des Messprozesses				Ergebnis
Kriterien:				Der Messprozess ist bedingt geeignet!
relativer Gesamtstrebereich (Toleranzausnutzung)	0% < %R&R ≤ 20%	20% < %R&R ≤ 30%	%R&R > 30%	
Messprozess	geeignet	bedingt geeignet	ungeeignet	