

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

„Instrumente zur Qualitätskontrolle in der Solarzellenproduktion“

Akronym „PVQC“

Förderkennzeichen 0327616

Projektlaufzeit: 01.10.2006 – 30.09.2009

Berichterstattung:

Dr. Wilhelm Warta, Johannes Giesecke, Bernhard Michl

Freiburg, März 2010

Ausführendes Institut:

Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstrasse 2, D-79110 Freiburg
Tel. 0761 4588 - 5192; Fax 0761 4588 -9250
Email: wilhelm.warta@ise.fraunhofer.de

Projektleitung: Dr. W. Warta

Projektpartner:

Deutsche Cell, Freiberg

Q-Cells, Thalheim

Schott Solar, Alzenau

Das diesem Bericht zugrundeliegende Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0327616 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Planung und Ablauf	9
1.1	<i>Arbeitsprogramm</i>	9
1.2	<i>Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn</i>	10
2	Evaluierung der Mess- und Vorhersagemöglichkeiten	12
2.1	<i>Ausgangssituation: Möglichkeiten und Nutzen von Kontrollmaßnahmen</i>	12
2.2	<i>Zusammenhang Messdaten und Solarzellenergebnisse</i>	12
3	Entwicklung Schichtwiderstandsmessung	17
3.1	<i>Verfahren der Schichtwiderstandsmessung nach dem Wirbelstrom-Prinzip</i>	17
3.2	<i>Evaluierung des Vierspitzen-Messgeräts</i>	19
3.3	<i>Qualifizierung der Wirbelstrom-Messtechnik</i>	20
3.4	<i>Vergleiche mit IR-Kamera basierten SRI-Messungen</i>	23
4	Schnelle Thermographie: Shunts und Hot-Spots	24
4.1	<i>Modellshunts zur Quantifizierung der lokalen Wärmeentwicklung</i>	25
4.2	<i>Quantifizierung der Leistungsbeiträge im ILIT-Signal</i>	26
4.3	<i>Messmethode Ultra-Fast-DLIT</i>	28
4.4	<i>Wärmeumverteilung auf Solarzellen in Rückwärtsschaltung</i>	29
4.5	<i>Praktische Durchführung der schnellen Detektion von „Hot-Spots“ mit UF-DLIT</i>	31
5	Abbildung von Serienwiderstandsverteilungen	35
5.1	<i>Einführung</i>	35
5.2	<i>Netzwerksimulationen mit LTSpice</i>	37
5.3	<i>Der orts aufgelöste Serienwiderstand – Analyse der verfügbaren Lumineszenzmethoden</i>	41
5.4	<i>Praktischer Vergleich verschiedener experimenteller Methoden</i>	49
6	Quantifizierung von Rekombinations- und Widerstandseigenschaften mittels bildgebender Lumineszenzverfahren	62
6.1	<i>Messung von Minoritätsträger-Diffusionslängen in Siliciumsolarzellen mittels Elektro- und Photolumineszenz</i>	65
6.2	<i>Trennung lokaler Volumen- und Oberflächenrekombination in kristallinem Silicium mittels Reabsorption von Lumineszenz</i>	70
6.3	<i>Verteilung lokaler Diodenspannungen aus bildgebender Elektrolumineszenz – Untersuchung zur direkten Kalibrierung einzelner Messungen & Serienwiderstands-Imaging</i>	78
6.4	<i>Abschätzung kleinster Lebensdauern in sägerauen Wafern mittels Photolumineszenz</i>	86
	Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens	98
	Literaturverzeichnis	100

Zielsetzung

Das Projekt zielt auf die Entwicklung und den Test der praktischen Einsetzbarkeit neuer Methoden zur Qualitätskontrolle in der Produktion von Solarzellen. Es sollte zunächst in Zusammenarbeit mit den beteiligten Herstellerfirmen, mit Hilfe von Untersuchungen an Solarzellen aus der Produktion und begleitenden Modellbildungen festgestellt werden, welche Messgrößen für die Produktionskontrolle aus der Sicht der Firmen relevant und welche aussagefähig bestimmbar sind. Für diese Kenngrößen sollten durch Grundlagenuntersuchungen zur Anwendbarkeit vorhandener Messgeräte und Entwicklung neuer Verfahren Messmöglichkeiten realisiert und prozessnah getestet werden. Vorgehen waren nach Projektplanung Arbeiten an Verfahren zur Messung des Schichtwiderstands, der Trägerlebensdauer und der Leistungsverluste aufgrund parasitärer Widerstände. Auf der Basis von Messreihen, die in der Pilotproduktion am Fraunhofer ISE oder an Zellen aus der Produktion der industriellen Partner gewonnen wurden, sollte die Eignung der Verfahren zur Feststellung von Ursachen für Abweichungen und als Ausgangspunkt für korrektive Maßnahmen im Prozess geklärt werden.

Zusammenfassung

Zu Beginn des Projekts wurden Möglichkeiten und Nutzen von Kontrollmaßnahmen im Dialog mit der Industrie geklärt. Weiter wurde der Zusammenhang von Messdaten und Solarzellenergebnissen an Gruppen von Zellen aus der Industrieproduktion analysiert, eine Modellstudie zur Auswirkung inhomogener Emitterschichtwiderstände sowie für die anfangs favorisierte Methode der Illuminated Lock-In-Thermography (ILIT) eine experimentelle Studie durchgeführt, in der die praktische Nachweisbarkeit gezielt in der Solarzellenherstellung eingeführter Defekte demonstriert wurde.

Von Seiten der Industriepartner war von zentralem Interesse, ein genaues kontaktloses Verfahren zur Kontrolle des Schichtwiderstands zur Verfügung zu haben. Bei der im Projektantrag hierfür favorisierten Sheet Resistance Imaging (SRI) Methode, bei der eine MWIR-Kamera zur Abbildung der Ladungsdichte eingesetzt wird, konnten Probleme bei der quantitativen Messung für inhomogene Oberflächen für den Einsatz an Wafern aus der Industrieproduktion nicht ausgeräumt werden. In der Folge wurde daher zur in-line Schichtwiderstandskontrolle die im PV-TEC erstmals in-line eingesetzte Messung nach dem Wirbelstromprinzip ausgewählt. An diesem Messgerät wurde eine umfassende Untersuchungsreihe zur Qualifikation der mit diesem Verfahren erreichbaren Ergebnisse durchgeführt. Die Evaluierung erfolgte im detaillierten Vergleich mit der (langsamen und nicht kontaktlosen) Off-line Vier-Spitzen-Messung. Reproduzierbarkeit und Genauigkeit für repräsentative, umfangreiche Stichproben standen im Vordergrund. Es stellte sich dabei heraus, dass Abweichungen zwischen den beiden Verfahren im Wesentlichen auf Probleme der Vier-Spitzen-Messtechnik zurückzuführen waren. Die Wirbelstrom-Methode erwies sich als gut praxistauglich. Ein Hauptnachteil, die Notwendigkeit der vergleichenden Messung am selben Wafer vor und nach der Emitterdiffusion, konnte allerdings bisher nicht beseitigt werden. Weitere Arbeiten hierzu sind jedoch vorgesehen.

Während des Projektes war, getriggert durch den Einsatz von UMG-Silicium, die Frage der Rückwärtsdurchbrüche von Solarzellen und vor allem nach einer schnellen, möglichst produktionsnahen Kontrolle der Ortsverteilung von Rückwärtsdurchbrüchen ein wichtiges Forschungsthema geworden. Dies wurde daher neben der Abbildung der Verluste in Vorwärtsrichtung in Kurzschlüssen (Shunts) ein Arbeitspunkt. Das Vorhandensein von Shunts und Rückwärtsdurchbrüchen lässt sich durch den Kontrast feststellen, den sie in Wärmebildern verursachen. Quantitative Angaben und damit Aussagen über die Bedeu-

Die beobachteten lokalen Wärmequellen waren bisher jedoch nur schwer erzielbar. Wir haben daher zunächst eine umfassende Analyse der Mechanismen durchgeführt, die zu einer lokalen Signalerhöhung im Thermographiebild führen. Mit Hilfe gezielt hergestellter, gut definierter Punktquellen und deren Beschreibung konnten wir eine Basis gewinnen, die uns gestattet, quantitative Aussagen über die Nachweisbarkeitsgrenzen zu treffen, insbesondere auch bei auf schnelle Detektion optimierten Messungen.

Mit der Ultra-Fast DLIT (Dark Lock-In Thermography) konnte eine In-Line-taugliche Detektion lokaler Wärmequellen eingeführt werden. Wir haben eine ausführliche Analyse der Einflussfaktoren und der erreichbaren Sensitivität durchgeführt. Damit konnten wir eine Ausführungsvorschrift für eine exakte Klassifizierung von Hot-Spots bei einer Messzeit von 10 ms und Detektionsgrenze von 60 mW lokaler Leistungsdissipation erarbeiten. Die praktische Einsetzbarkeit der Ultra-Fast DLIT wurde untersucht. Anfängliche Probleme konnten durch ein vierstufiges Auswerteverfahren überwunden werden. Die Detektionsgrenzen für Punkt- und Flächenshots wurden unter realistischen Bedingungen und für sehr kurze Messzeiten im Bereich von 10 ms ermittelt.

Die industrielle Anwendbarkeit der lumineszenzbasierten, orts aufgelösten Serienwiderstandsmessung wurde experimentell und theoretisch geprüft. Das Hauptaugenmerk bei der Messung des orts aufgelösten R_s liegt auf der Detektion von Prozessproblemen, die zu lokal erhöhten Serienwiderstandswerten führen. Durch die Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie kann ein erhöhter Serienwiderstand zwar detektiert werden, die Ursache bleibt jedoch unklar. In einer orts aufgelösten Messung kann diese hingegen sofort identifiziert werden.

Zur Berechnung eines lokalen Serienwiderstandes wird meist die Spannungsdifferenz zwischen den äußeren Kontakten und der lokalen Spannung durch den lokalen Strom geteilt. Dieser Definition liegt ein Modell zugrunde, bei dem alle Pixel unabhängig voneinander betrachtet werden und parallel geschaltet sind. Dieser lokale Serienwiderstand ist jedoch nicht unabhängig von Veränderungen der lokalen Rekombinationsrate, also der Dunkelsättigungsstromdichte der lokalen Dioden. Es wurde gezeigt, dass im Hellen und für kleine Spannungen dies jedoch nicht zum Vorschein kommt, weshalb sich diese Messbedingungen als vorteilhaft erweisen.

Da keine quantitativ vergleichbare orts aufgelöste Referenzmessung existiert, wurde der global gemessene Serienwiderstand als Referenz verwendet. Hierfür muss ein geeignetes Verfahren benutzt werden, das die Bildinformation in einen Serienwiderstandswert bündelt. Eine Analyse des den Messungen zugrunde liegenden Netzwerkmodells ergab, dass eine arithmetische Mitte-

lung eine gute Methode darstellt. Bei größeren Serienwiderständen kann eine Netzwerksimulation bessere Werte liefern. Zwei Dunkel- und zwei Hellmethoden wurden experimentell an mono- und multikristallinem Material getestet. Unter den vier Methoden kristallisierte sich klar heraus, dass die Hellmethode RsPL von Trupke et al [14] am besten geeignet ist. Die zwei Dunkelmethoden liefern nur Ergebnisse über den weniger interessanten Dunkelwiderstand und die andere Hellmethode bringt längere Mess- und Auswertzeiten mit sich. Mit RsPL ist eine schnelle Messung (800ms) und Auswertung bei quantitativ guter Übereinstimmung zu global gemessenen Serienwiderstandswerten möglich. Es wurde gezeigt, dass die Erniedrigung des Füllfaktors durch einen Prozessfehler aus einem Serienwiderstandsbild berechnet werden kann. Für typische industriell gefertigte Zellen bietet die lumineszenzbasierte, orts aufgelöste Serienwiderstandsbestimmung somit eine inline-fähige und zuverlässige Charakterisierung.

Orts aufgelöste Lumineszenzmessungen enthalten Informationen über verschiedene Größen, die die Qualität von Solarzellen beeinflussen – neben den Widerstandseigenschaften vor allem über Rekombinationseigenschaften wie der Ladungsträger-Lebensdauer und -Diffusionslänge und der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit. Die Notwendigkeit qualifizierter Lebensdauer-messungen in Siliciumsolarzellen und ihnen vorgelagerten Produktionsstadien (Wafers) zur Material- und Prozesskontrolle hatte z. T. hohes Interesse bei den Partnern. Die Arbeiten im Projekt waren vor allem darauf gerichtet, quantitative Aussagen getrennt für die verschiedenen Einflussfaktoren zu erhalten.

Zunächst wurde eine auf Reabsorption von Elektrolumineszenz basierende Methode zur Bestimmung der Elektronen-Diffusionslänge über das Tiefenprofil der Überschussladungsträgerdichte getestet [Würfel et al., J. Appl. Phys. 101, 123110, 2007]. Aus den Untersuchungen zur praktischen Anwendbarkeit ergaben sich verschiedene Verfeinerungen der Methode, wie z.B. eine Korrektur der lateralen Inhomogenität verwendeter optischer Kurzpass-Filter oder die Notwendigkeit der Berücksichtigung der exakten Proben temperatur in der zugrundeliegenden Modellierung. Eine Erweiterung auf Photolumineszenz an Wafers wurde aufgrund theoretischer Überlegungen als zu kontrastarm eingestuft, als kontrastreichere Alternative wurde der neue Weg einer einfachstmöglichen Lebensdauerbestimmung an glatten Siliciumwafers aus einzelnen Photolumineszenz-Messungen ohne Gegenkalibrierung beschritten – mit Erfolg. Das Potenzial dieser direkten Kalibrierung einzelner Lumineszenzmessungen, etwa für weitergehende Anwendungen wie z.B. Serienwiderstandsmessungen mittels Elektrolumineszenz, wurde ausgelotet.

Die genaue Verortung rekombinationsaktiver Bereiche (Volumen vs. Oberfläche) ist für die Prozesskontrolle von besonderem Interesse. In einem erweiterten Ansatz basierend auf der Messung der Reabsorption von Lumineszenz mittels optischer Kurzpass-Filter wurde deshalb die Trennung von Oberflächen- und Volumenrekombinationseigenschaften an sowohl Siliciumsolarzellen (Elektrolumineszenz) als auch Wafern (Photolumineszenz) bewerkstelligt.

Eine Methode zur Eliminierung des Einflusses der Reflexion von Anregungsstrahlung in Photolumineszenzmessungen an Wafern mit sehr geringer Lebensdauer (z.B. unpassiviert, sägerau), und eine Methode zur Abschätzung kleiner Lebensdauern in derartigen Wafern wurden entwickelt. Diese Entwicklungen sind potentiell von großem Interesse für die Material- und Eingangskontrolle in der Solarzellenindustrie.

Bei der Fortsetzung dieser Arbeiten in dem inzwischen begonnen Projekt QUASSIM konnte durch eine Erweiterung der Auswertung von PL-Messungen an as-cut-Wafern eine wichtige Korrelation festgestellt werden: Ermittelt man für die dort untersuchten Wafer den Anteil der Waferfläche mit kleinen Lebensdauern (defektreiche Gebiete), was ja nach den hier erzielten Ergebnissen wegen der in diesen Gebieten vorliegenden geringem Trägerlebensdauer gut möglich ist, so kann man dafür eine Korrelation mit dem erzielten Wirkungsgrad herstellen. Eine aussagefähige Wertung der Messungen an as-cut-Wafern erfordert somit als einen weiteren Schritt eine dort entwickelte Methode zur Erkennung dieser besonders hochrekombinationsaktiven Gebiete.

1 Planung und Ablauf

Während der Planung des Projekts war aufgrund des wachsenden Interesses eine rasche Entwicklung bei der Messtechnik für die PV erwartet worden. Bei der Projektplanung waren daher zwar bereits einige Techniken konkret angesprochen worden. Es war jedoch Wert darauf gelegt worden, dass einerseits die Zielsetzungen am Projektbeginn nochmals mit den Industriepartnern zusammen diskutiert und aktualisiert wurden. Andererseits wurde schon im Antrag eine hohe Flexibilität zur Umorientierung auf aktuelle Verfahren zur Erreichung dieser Ziele angelegt.

1.1 Arbeitsprogramm

Für den Ablauf der Arbeiten war eine Gliederung in drei Phasen geplant: In Phase 1 sollten grundlegende Fragen zu den Kontrollmöglichkeiten und ihrer Aussagefähigkeit geklärt, in Phase 2 Anforderungen und notwendige Erweiterungen von Messverfahren untersucht und in Phase 3 Einsatz und Nutzen getestet werden.

Im ersten Arbeitspunkt wurden Möglichkeiten und Nutzen von Kontrollmaßnahmen im Dialog mit der Industrie geklärt. Im Anschluss wurde der Zusammenhang von Messdaten und Solarzellenergebnissen untersucht: Dazu wurden Gruppen von Zellen aus der Industrieproduktion analysiert, eine Modellstudie zur Auswirkung inhomogener Emitterschichtwiderstände durchgeführt sowie für die Methode der Illuminated Lock-In-Thermography (ILIT) eine experimentelle Studie durchgeführt, in der die praktische Nachweisbarkeit gezielt in der Solarzellenherstellung eingeführter Defekte untersucht wurde.

Im Verlauf der Projektarbeit stellte sich heraus, dass die Entwicklung und der Test von Messverfahren an Industriezellen (Phase 2 und 3 des Arbeitsprogramms) meist stark ineinander verwoben waren. Im praktischen Ablauf der Projektarbeit und auch als eine sinnvolle Darstellung in diesem Bericht ergab sich daher eine Kombination der in den Phasen 2 und 3 geplanten Arbeiten und eine gemeinsame Darstellung nach der untersuchten Messgröße und nicht nach der ursprünglichen Gliederung. Zu den einzelnen Messgrößen werden dabei sukzessive Grundlagen- und anwendungsorientierte Arbeiten dargestellt. Die durchgeführten Arbeiten gliedern sich damit wie folgt:

- Entwicklung Schichtwiderstandsmessung (Abschnitt 3)
- Schnelle Thermographie: Shunts und Hot-Spots (Abschnitt 4)

- Abbildung von Serienwiderstandsverteilungen (Abschnitt 5)
- Quantifizierung von Rekombinations- und Widerstandseigenschaften mittels bildgebender Lumineszenzverfahren (Abschnitt 6)

In Abschnitt 6 werden speziell neue Methoden untersucht, die kombiniert in PL/EL-Bildern auftretenden Eigenschaften getrennt von einander zu ermitteln.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Qualitätskontroll-Systeme zur Sicherung der Qualität der gesamten Management- und Produktionsvorgänge waren bei Projektbeginn bei vielen Herstellern auch im Photovoltaik-Bereich etabliert. Allerdings waren Kontrollmöglichkeiten für entscheidende Parameter nur unzureichend mit den auf dem Markt verfügbaren Messmöglichkeiten zu realisieren. Dies galt z.B. für die Materialqualität und ihre Entwicklung beim Produktionsvorgang. Diagnoswerkzeuge, die speziell auf die Bedürfnisse der Solarzellenherstellung zugeschnitten sind, waren nur spärlich verfügbar und entsprachen oft noch nicht den Qualitätsanforderungen der Solarzellen-Hersteller. Verfügbare Messverfahren waren nicht daraufhin untersucht, ob sie in der Lage sind, Daten zu liefern, mit denen ein direkter Bezug zur Solarzellenqualität hergestellt werden kann. Zwischen den Kontrollnotwendigkeiten und den vorhandenen Möglichkeiten bestand eine erhebliche Diskrepanz.

Schichtwiderstandsverteilungen im Emitter

Zur Messung von Schichtwiderständen nach der Emitterdiffusion war im Rahmen des EU-Projekts FastIQ ein in-line-fähiges Verfahren eingeführt worden, bei dem Überschlußladungen optisch generiert und die dadurch aufgebaute Oberflächen-Photospannung (Surface Photo-Voltage SPV) kapazitativ abgegriffen wird [1]. Das Verfahren arbeitet mit einem einzelnen Messfleck und kann in der verfügbaren Version keine orts aufgelösten Information liefern.

Orts aufgelöste Messungen des Schichtwiderstands wurden üblicherweise mit Vierspitzen-Messungen durchgeführt: Ein Tastkopf rastert dabei die Probenoberfläche ab. Das Verfahren ist langsam und nicht berührungsfrei. Am Fraunhofer ISE wurde auf der Basis der IR-Absorption freier Ladungsträger ein neues Verfahren, Sheet Resistance Imaging SRI eingeführt [2]. Dabei wird mit einer IR-Kamera der Wafer als Bild aufgenommen. Das Verfahren war an Wafern mit glatten Oberflächen demonstriert worden. Für die praktische Einsetzbarkeit war vor allem die Frage der Trennung von optischen Effekten offen.

Widerstandsverluste in Emitter und Metallisierung

Diese Verluste konnten fast ausschließlich sehr aufwendig anhand speziell prozessierter Teststrukturen untersucht werden. Corescan [3][1], ein kommer-

ziell erhältliches Messgerät, arbeitete destruktiv mit einer Nadelsonde, die die Oberfläche der Zelle in parallelen, durch die AR-Schicht kontaktierten Linien abfährt. Kontaktwiderstandsverteilungen konnten so bestimmt werden, die Verteilung des Emitterwiderstands konnte aufgrund von Signal/Rausch Problemen nur bei sehr starken Abweichungen ausgewertet werden.

In PVQC war die Untersuchung des Einsatzes der Hellthermographie als eine Möglichkeit zur Darstellung der Widerstandsverluste vorgesehen. Dazu sollten einerseits die dafür notwendigen Grundlagen und apparativen Voraussetzungen evaluiert, aber auch der Nutzen anhand von Anwendungen auf konkrete Industriesolarzellen eruiert werden. Eine aktuelle Entwicklung nutzte zur Detektion von Inhomogenitäten in der Potentialverteilung nicht die Wärmestrahlung, sondern die zur Potentialverteilung korrelierte Ladusträgerdichte über eine Abbildung der Photolumineszenz. Diese Methode sollte am Fraunhofer ISE aufgebaut und alternativ, je nach Eignung, eingesetzt werden.

Abbildung der Rekombinationseigenschaften

Für die Messung von Trägerlebensdauern waren mehrere Verfahren verfügbar. Ein sehr nützliches und weithin akzeptiertes Werkzeug zur Messung der Lebensdauer von Überschussladungsträgern an Wafern wird von Sinton Consulting mit der Quasistatischen Photoleitfähigkeitsmessung (QSSPC) angeboten und bereits vielfältig eingesetzt. Die Ortsauflösung ist jedoch sehr beschränkt. Mit den zur Zeit des Projektbeginns stark aufkommenden Lumineszenz-basierten Verfahren war eine hohe Ortsauflösung möglich, weswegen die Arbeit an diesen Verfahren favorisiert wurde.

Eine ortsauflösende Messtechnik für Trägerlebensdauern, die als industrielles Produkt erhältlich war, ist die Mikrowellendetektierte PCD. Die Interpretation und Bewertung der Messergebnisse erfordert viel Erfahrung und Zeit. Bedingt durch das Abrastern der Probe ist die Messung langsam. Dies gilt insbesondere, wenn für quantitative Auswertungen Niedriginjektionsbedingungen eingehalten werden sollen. Die Messzeit beträgt dann viele Stunden. Schnelle Prozesskontrolle ist nur sehr begrenzt mit niedriger Ortsauflösung möglich.

Ein alternatives Verfahren, die ortsabhängige Trägerlebensdauer aus der Absorption von Wärmestrahlung an freien Ladungsträgern mit einer IR-CCD-Kamera zu bestimmen (CDI/ILM) war zu Projektbeginn im Laboreinsatz bereits gut verfügbar und sollte ursprünglich auf den Industrieinsatz hin weiterentwickelt werden. Für schnelle und zugleich möglichst kostengünstige Messungen erschien aber auch hier der Einsatz der Lumineszenz, auch aufgrund der deutlich kostengünstigeren Kamerasysteme, vielversprechender.

2 Evaluierung der Mess- und Vorhersagemöglichkeiten

2.1 Ausgangssituation: Möglichkeiten und Nutzen von Kontrollmaßnahmen

Beim ersten Treffen mit den Industriepartnern wurde zu den Fragestellungen des Projekts, welche Messungen sind zur QC in der Produktion wichtig, wo liegen die Probleme, für die Kontrolle nötig ist, welche Methoden werden bereits eingesetzt und welche weiteren Methoden werden für notwendig erachtet detaillierte Diskussionen mit der Industrie geführt. Die Nützlichkeit und Einsetzbarkeit von Lebensdauermessungen sowie thermografischer Methoden z.B. zur Shunt-Detektion wurde zwar kontrovers gesehen, es gab aber teilweise dezidiertes Interesse. Um hier eine gute Grundlage zu schaffen, wurden quantitative Auswertungen von Lebensdauermessungen mit Lumineszenz (Abschnitt 6) und mit Lock-In-Thermographie (Abschnitt 4) erarbeitet. In-Line-Photolumineszenzrmessung zur Kontrolle und schnellen Reaktion bei Problemen war von Interesse, insbesondere nach der Emitterdiffusion, ebenso auch die Möglichkeit der Messung an as-cut-Wafern zur Eingangskontrolle. Arbeiten zu dieser Fragestellung werden in Abschnitt 6.4 vorgestellt. Übereinstimmend war von zentralem Interesse, ein genaues kontaktloses Verfahren zur Kontrolle des Schichtwiderstands zur Verfügung zu haben. Dies wird in Abschnitt 3 auf der Basis einer Wirbelstromtechnik untersucht. In Abschnitt 4 werden die umfangreichen Arbeiten zur Qualifizierung von Serienwiderstandsbestimmungen aus Lumineszenzbildern berichtet, bei denen der Einfluß des Schichtwiderstand in der Zelle in Erscheinung tritt.

2.2 Zusammenhang Messdaten und Solarzellenergebnisse

Zu Beginn der Projektlaufzeit waren umfassende Analysen ungeklärter Unterschiede bei Zellgruppen von zwei der beteiligten Industriepartner begonnen worden. Resultate wurden bilateral an die Industriepartner berichtet. Die Ergebnisse wurden von den Partnern als vertraulich eingestuft, was zu einer kontroversen Diskussion auf dem folgenden Projekttreffen führte. Die Möglichkeit einer Detaildiskussion analysierter Probleme wurde als wesentlich angesehen, diese Arbeiten wurden daher zu Gunsten der Ermittlung allgemeingültiger, nicht auf eine bestimmte Produktion bezogener Aussagen zurückgestellt. Ein Beispiel für eine solche Untersuchung ist im Folgenden dargestellt

Auswirkung inhomogener Emitterschichtwiderstände

Inhomogenitäten im Schichtwiderstand waren als ein wichtiges Thema angesprochen. Es wurde daher eruiert, welche Auswirkungen auf das elektrische Verhalten von Solarzellen zu erwarten sind. Insbesondere wurden Simulationsarbeiten zu der Fragestellung durchgeführt, inwieweit Inhomogenitäten des Emitterschichtwiderstands, wie sie mit In-line-Kontrollmethoden festgestellt werden können, sich in der fertigen Solarzelle negativ auswirken. Diese Rechnungen stellen einen Ansatz zur Bewertung der individuell in einer Produktionslinie beobachteten lateralen Schwankungen zur Verfügung. Für die Untersuchung wurde der Netzwerksimulator eingesetzt und ein weiter Schichtwiderstandsbereich mit industrierelevanten flachen Emitterprofilen mit hoher Oberflächenkonzentration abgedeckt. Experimentell ermittelte Kontaktwiderstände für unterschiedliche Emitterschichtwiderstände wurden einbezogen. Die Rechnungen ergeben, dass Schwankungen des Emitterschichtwiderstandes nur bei sehr hoher Variation eine deutliche Verschlechterung bewirken. Die Ergebnisse wurden auf der EU-PVSEC in Valencia vorgestellt [4].

Da nach früheren Rechnungen Probleme nicht von der lateralen Variation der Diodeneigenschaften, sondern von der Variation der Kontaktwiderstände beim Feuern der Metallisierung herrühren, wurden hierfür empirisch ermittelte Zusammenhänge eingesetzt. Abb. 1 zeigt gemessene Kontaktwiderstände in Abhängigkeit vom Schichtwiderstand. Cz- und mc-Material verhalten sich aufgrund der verschiedenen Oberfläche unterschiedlich.

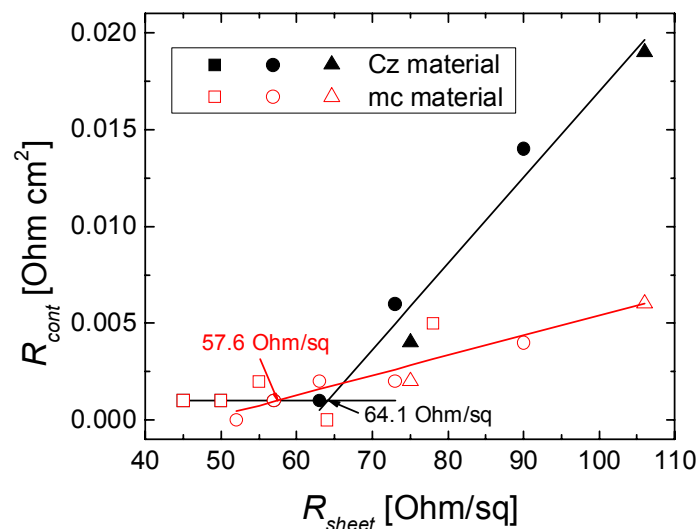


Abb. 1: Experimentell ermittelte Kontaktwiderstände für unterschiedliche Emitterschichtwiderstände.

Zunächst wurde der Einfluss der verschiedenen Emitter auf die IV-Kennlinie für homogene Emitterdiffusion ermittelt. Dann wurde für zwei unterschiedliche Modellstrukturen inhomogen verteilter Emittereigenschaften (Struktur 1 und 2) der Einfluss dieser Inhomogenität einerseits mit konstanter, andererseits mit der experimentell ermittelten Variation des Kontaktwiderstands berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

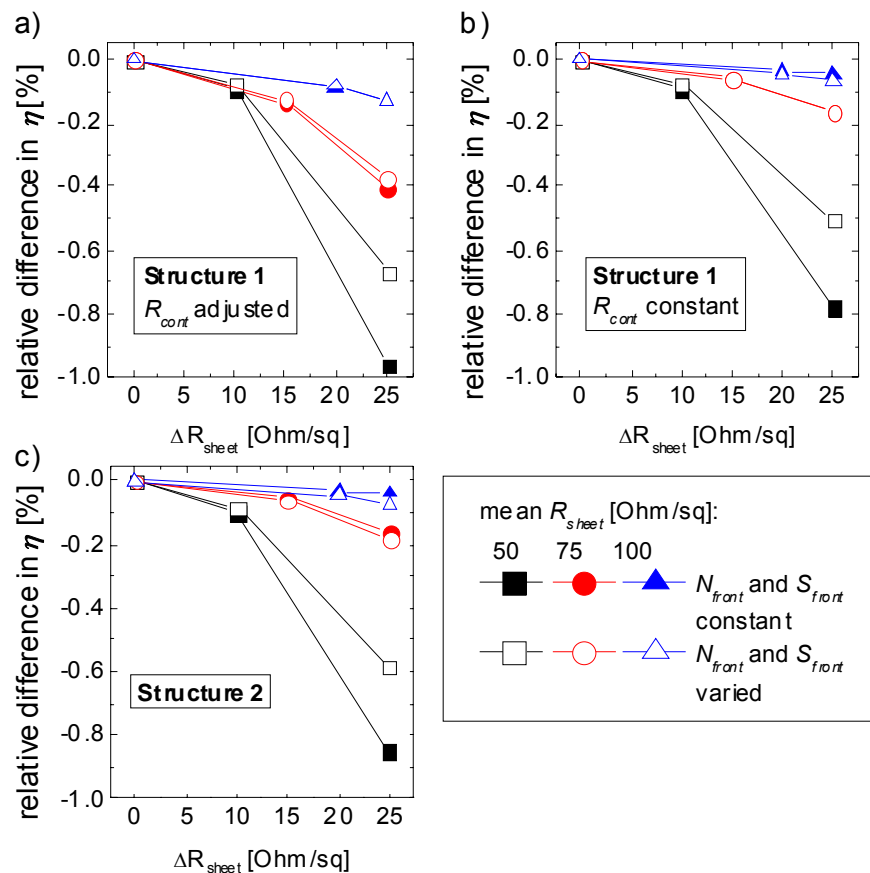


Abb. 2: Relative Änderung der IV-Parameter bei unterschiedlichem Ausmaß der Inhomogenität des Emitterschichtwiderstands. Die Dotierkonzentration an der Oberfläche N_{front} und die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S_{front} wurden entweder konstant gehalten oder variiert.

Die Rechnungen ergaben, dass Schwankungen des Emitterschichtwiderstandes nur bei sehr hoher Variation eine deutliche Verschlechterung bewirken. Die Ergebnisse wurden auf der EU-PVSEC in Valencia veröffentlicht [4].

Die hier ermittelte und in der Modellierung verwendete Abhängigkeit des Kontaktwiderstands vom Schichtwiderstand ist recht moderat und begründet den geringen beobachteten Einfluss. Für eine andere Produktionssituation, in der stärkere Abhängigkeiten beobachtet werden, lassen sich Rechnungen nach dieser Vorgehensweise jederzeit durchführen.

Untersuchung zur Abgrenzung verschiedener Verlustmechanismen auf der Basis von ILIT-Messungen

Zu Beginn des Projekts stand zur abbildenden Untersuchung verschiedener Verlustmechanismen in erster Linie die ILIT-Messung bei verschiedenen Arbeitspunkten der Solarzelle zur Verfügung. Für welche Parameter mit EL/PL-Messungen kostengünstigere und schnellere Methoden entwickelt werden konnten, war noch unklar. Daher wurde zunächst ein umfassender Versuch zum praktischen Einsatz von ILIT durchgeführt. Ziel dieses Versuchs war es, zu klären, inwieweit die Abgrenzung von technologisch bedingten Verlusten durch Serien- und Parallelwiderstände von materialbedingten Verlusten mit ILIT-Messungen unter verschiedenen Messbedingungen möglich ist. In einem Experiment an einer großen Zahl industriell hergestellter Solarzellen wurden Zellgruppen im PV-TEC mit einer Variation der Feuerbedingungen der Metallisierung prozessiert und zur Bestimmung des Einflusses der Kurzschlüsse an den Zellrändern vor und nach der Laserkantenisolation (LKI) gemessen. Dadurch stand ein Satz von Proben zur Verfügung, in denen unterschiedliche Probleme aufgrund genau definierter technologischer Fehler auftraten. An den Zellen wurden Untersuchungen durchgeführt, ob und mit welchen Kombinationen von Messungen eindeutige Rückschlüsse auf das jeweilige vorgegebene technologische Problem möglich sind. Die Ergebnisse wurden auf der EU-PV-Konferenz in Mailand 2007 berichtet [5] und finden sich im Detail in der Veröffentlichung. Der Prozess- und Messplan ist in Abb. 3 dargestellt.

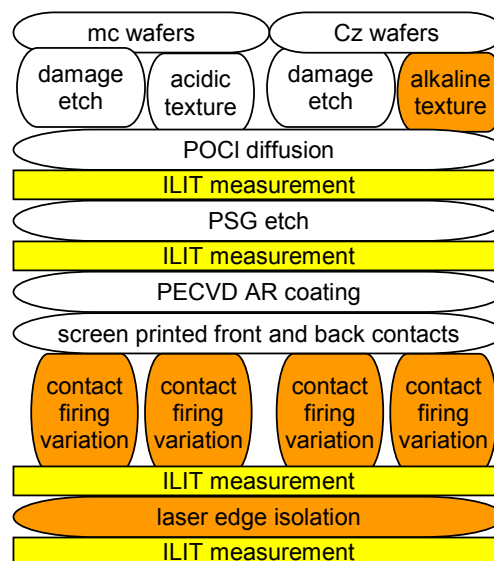


Abb. 3: Prozessablauf und Messplan für die Proben mit gezielt eingebrachten technologischen Problemen.

Als ein Ergebnisbeispiel sei die Untersuchung des Einflusses von Änderungen der Emissivität aufgrund variierender Oberflächeneigenschaften auf die Messergebnisse angeführt. Abb. 4 zeigt die unterschiedlichen Signalstärken, die bei Sägeschaden-geätzten bzw. texturierten Wafern erhalten werden.

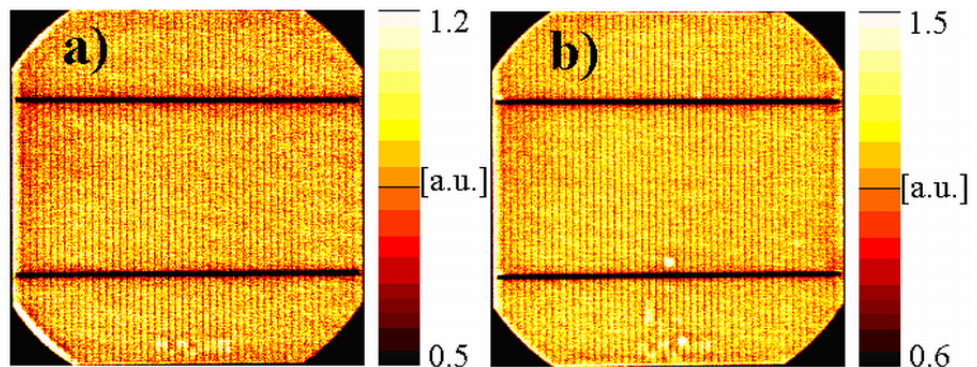


Abb. 4: Voc-ILIT-Bilder von zwei Cz-Solarzellen mit a) Sägeschaden-geätzter, b) texturierter Oberfläche. Zu beachten ist die unterschiedliche Skala der Signalstärken.

Für die Abgrenzung solcher rein optischer Effekte von den gesuchten leistungsmindernden Defekten ist die Beobachtung wichtig, dass bei Messungen in unterschiedlichen Betriebsbedingungen einer Zelle solche Effekte leicht erkennbar sind. Abb. 5 zeigt dazu ein Beispiel.

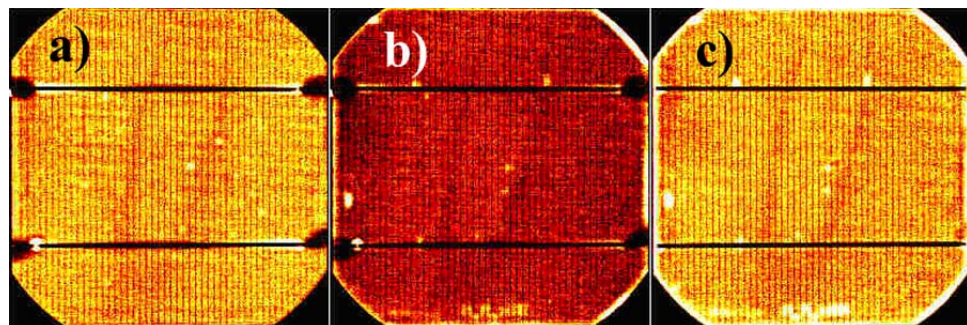


Abb. 5: Messung einer Zelle mit einer ovalen, durch unterschiedliche Emissivität der Oberfläche bedingten Struktur. Bei den Messung in unterschiedlichen Betriebszuständen a) in Isc, b) in MPP und c) in Voc zeigt sich diese Struktur unverändert.

In der Studie konnte der Einfluss der verschiedenen Effekte, der unterschiedlichen Emissivität der Oberfläche, der unterschiedlichen Qualität des Metall-Emitter-Kontakts, von Kanten-Shunts und stark lokalisierten Shunts sowohl auf Isc-, wie auf MPP- und Voc-ILIT-Bilder demonstriert und physikalische Interpretation entwickelt werden. Insbesondere wurde gezeigt, dass mit MPP-ILIT-Bildern eine nicht-ideale Laserkantenisolation für globale RP-Werte kleiner $1 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ eindeutig nachgewiesen werden kann. Für die Serienwiderstandsbestimmung waren zwischenzeitlich mit Lumineszenz-basierten Verfahren sehr attraktive Alternativen entwickelt worden (s. Abschnitt 5).

3 Entwicklung Schichtwiderstandsmessung

Von Seiten der Industriepartner war von zentralem Interesse, ein genaues kontaktloses Verfahren zur Kontrolle des Schichtwiderstands zur Verfügung zu haben. Bei der im Projektantrag hierfür favorisierten Sheet Resistance Imaging (SRI) Methode, bei der eine MWIR-Kamera zur Abbildung der Ladungsdichte eingesetzt wird, hatten sich zwischenzeitlich Probleme bei der quantitativen Messung für inhomogene Oberflächen abgezeichnet, deren Lösung sich für den Einsatz an Wafern aus der Industrieproduktion als schwierig herausstellte. In der Folge wurde daher als schnellster Weg zu einer in-line Schichtwiderstandskontrolle die im PV-TEC erstmals in-line eingesetzte Messung nach dem Wirbelstromprinzip ausgewählt. An diesem Messgerät wurde, in Zusammenhang mit der bereits im PV-TEC-Projekt vorgesehenen Inbetriebnahme der Messplätze, eine umfassende Untersuchungsreihe zur Qualifikation der mit diesem Verfahren erreichbaren Ergebnisse durchgeführt. Die Evaluierung erfolgte im detaillierten Vergleich mit der (langsamen und nicht kontaktlosen) Off-line Vier-Spitzen-Messung. Reproduzierbarkeit und Genauigkeit für repräsentative, umfangreiche Stichproben standen im Vordergrund. Es stellte sich dabei heraus, dass Abweichungen zwischen den beiden Verfahren im Wesentlichen auf Probleme der Vier-Spitzen-Messtechnik zurückzuführen waren. Die Wirbelstrom-Methode erwies sich als gut praxistauglich. Ein Hauptnachteil, die Notwendigkeit der vergleichenden Messung am selben Wafer vor und nach der Emitterdiffusion, konnte allerdings bisher nicht beseitigt werden. Weitere Arbeiten hierzu sind jedoch vorgesehen. Ergebnisse zur Evaluierung dieser Methode wurden auf der EU-PV-Konferenz in Mailand 2007 vorgestellt [6].

3.1 Verfahren der Schichtwiderstandsmessung nach dem Wirbelstrom-Prinzip

Mit der untersuchten induktiven Messmethode kann der Schichtwiderstand von Silizium-Wafern berührungslos bestimmt werden. Das Messgerät ist in unserem Fall in eine automatische Fertigungslinie integriert. Wie in Abb. 6 gezeigt muss die Probe hierzu in den Spalt eines Ferritkerns gebracht werden. Dieser erzeugt mit Hilfe eines elektromagnetischen Schwingkreises ein magnetisches Wechselfeld welches senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung im Wafer einen Wirbelstrom induziert. Durch den Wirbelstrom entsteht wiederum ein Gegenmagnetfeld, das dem erzeugenden Feld entgegenwirkt und somit die elektromagnetische Schwingung dämpft. Der Strom, der benötigt wird, um die gemessene Spannung konstant zu halten ist proportional zum Kehrwert des Schichtwiderstandes. Somit muss lediglich eine Kalibrierkonstan-

te ermittelt werden, mit deren Hilfe sich der Schichtwiderstand der Messproben bestimmen lässt.

Prinzip und praktische Realisierung der Messtechnik sind in Abb. 6 und 7 dargestellt.

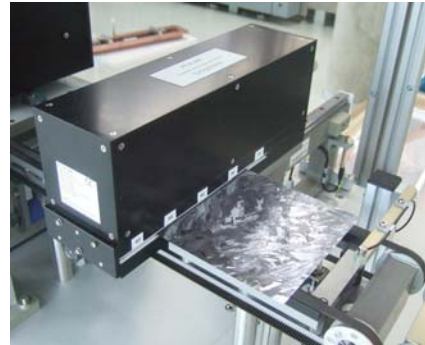
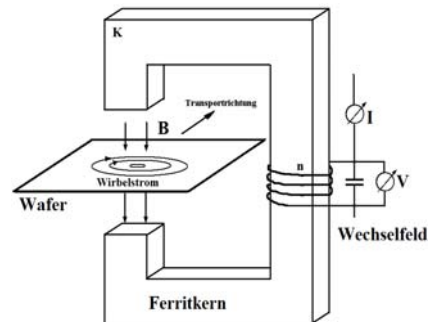


Abb. 6 Funktionsprinzip der induktiven Messmethode. In Abhängigkeit der Ladungsträger bilden sich im Wafer Wirbelströme, durch deren Gegenmagnetfeld der elektromagnetische Schwingkreis gedämpft wird. Der nachgeführte Strom ist proportional zur Ladungsträgerdichte.

Abb. 7 Eingebautes Inline-Messgerät in Automatisierungsstrecke des Diffusionsofens. Ein 156 mm x 156 mm mc-Si Wafer fährt durch den Messspalt und wird während dessen von 3 Sensoren gescannt.

Die Messgeometrie und der Zusammenhang mit den off-line durchgeführten 4-Spitzen-Messungen sind in Abb. 8 skizziert.

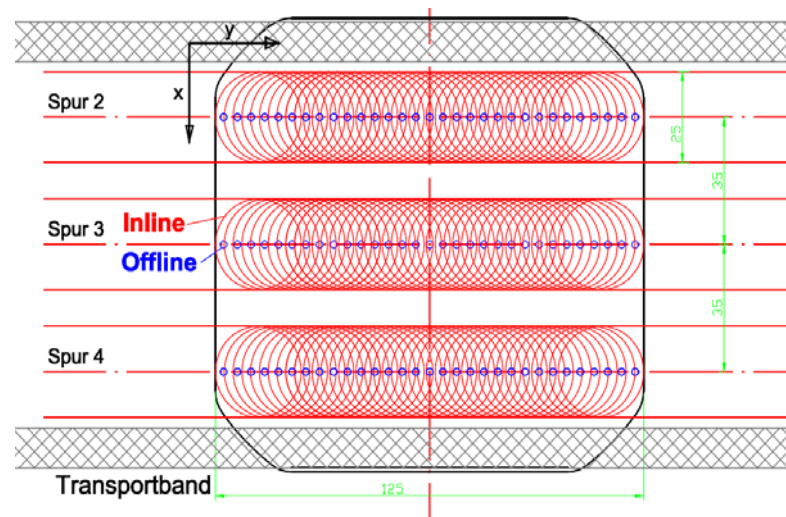


Abb. 8: Darstellung der Offlinemesspunkte (blau) und Inlinemessspuren (rot) zur Veranschaulichung der Messspuren und der jeweiligen Messbereiche.

3.2 Evaluierung des Vierspitzen-Messgeräts

Die routinemäßig eingesetzte Vierspitzen-Messtechnik sollte als Vergleichsmaßstab für das neue Verfahren dienen. Es erwies sich dabei allerdings als sehr wesentlich, auch die Unsicherheiten dieses Vergleichsverfahrens im Detail zu untersuchen.

Die erzielten Messergebnisse weisen unter optimalen Messbedingungen wie z.B. planen Oberflächen eine hohe Zuverlässigkeit auf. Problematisch können jedoch Widerstandsmessungen auf strukturierten Oberflächen sein, insbesondere deshalb, da Messartefakte durch eine suboptimale Kontaktierung von technologischen Effekten wie einer oberflächenabhängigen Diffusion unterschieden werden müssen. Die Bestimmung der Messgenauigkeit auf strukturierten Oberflächen wird dadurch erschwert, dass es bisher weder geeignete Referenzproben noch eine Referenzmethode gibt, die auf derartigen Oberflächen belastbare Ergebnisse liefert. Es wurden daher die messtechnischen Eigenschaften des 4-Spitzen-Messgeräts insbesondere im Hinblick auf die Anforderungen in der PV untersucht.

Zunächst wurde durch eine systematische Variation der optimale Messkopf sowie der optimale Anpressdruck für die in der Solarzellenherstellung relevanten Anwendungsbereiche bestimmt. Wichtige Ergebnisse wurden insbesondere für den Einfluss des Messspitzenradius und des optimalen Anpressdrucks erzielt. Ein Beispiel ist in Abb. 9 dargestellt.

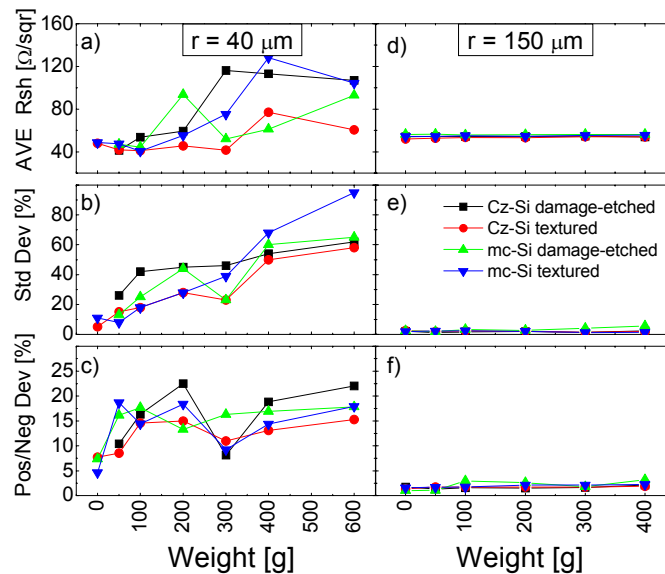


Abb. 9: Einfluss des Spitzenradius r und des Zusatzgewichts auf die Qualität der Emitterschichtwiderstandsmessung auf mono- und multikristallinem, Sägeschaden-geätzten bzw. texturierten Wafern.

Im Ergebnis können verlässliche Messungen mit einem Spitzenradius von 150 μm unabhängig vom Anpressdruck erzielt werden. Selbst mit optimaler Geometrie können jedoch bei der Vierspitzen-Messtechnik Probleme aufgrund der Messkopfabnutzung auftreten. Dies wird im folgenden Abschnitt im Vergleich mit den Wirbelstrommessungen deutlich.

Neben diesen apparativen Einflussfaktoren wurde auch auf äußere und prozessbedingte Faktoren eingegangen, die die Messgenauigkeit beeinflussen können. Von Bedeutung ist insbesondere die genaue Dickenmessung für die Bestimmung des Basiswiderstandes. Der Oberflächeneinfluss auf die 4-Spitzen-Messung konnte erst im Vergleich mit der Wirbelstromtechnik evaluiert werden. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss durch die Umgebungsbeleuchtung. Aus all diesen Ergebnissen konnten Aussagen über die Absolutgenauigkeit der 4-Spitzen-Messung abgeleitet und anhand wiederholter Messungen über längere Zeiträume ein Eindruck über die Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität von Messungen mit dem 4-Spitzen-Messgerät ermittelt werden.

3.3 Qualifizierung der Wirbelstrom-Messtechnik

Im Vergleich der beiden Messmethoden auf glanzgeätzten Wafern konnte problemlos eine gute Übereinstimmung erzielt werden (Abb. 10).

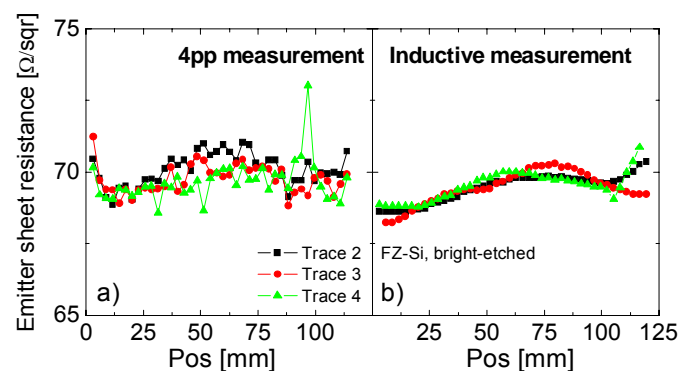


Abb. 10: Vergleichende Emitterschichtwiderstandsmessung auf einem glanzgeätzten Wafer

Der Vorteil der kürzeren Messzeit der induktiven Messtechnik äußerte sich in diesem Fall in einer Messzeit von zweimal 1.5 sec für die Wirbelstrommessung gegen 5 min für die 4-Spitzen-Messung.

Im Vergleich zu unebenen Oberflächen ergab sich jedoch ein anderes Bild. Die Untersuchungen wurden für einen breiten Bereich von Emitterschichtwiderständen örtlich aufgelöst durchgeführt. Für die folgenden Darstellungen wurden die einzelnen Messpunkte gemittelt.

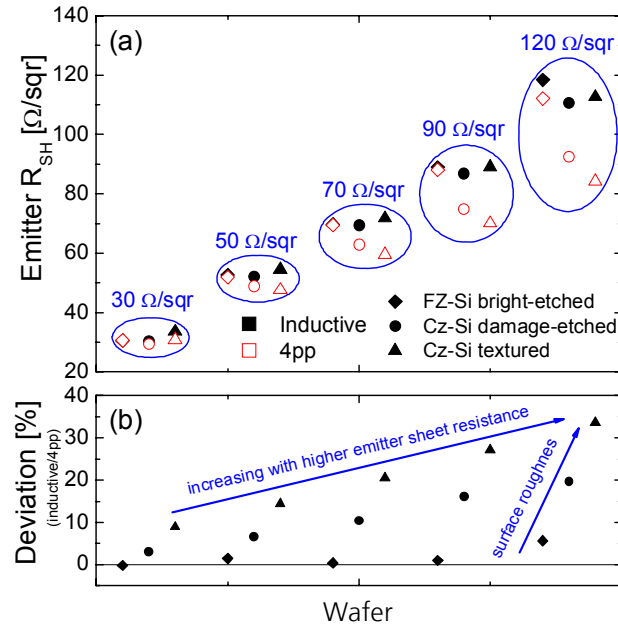


Abb. 11: Vergleich zwischen induktiver und 4-Spitzenmessung an Wafern mit unterschiedlichen Oberflächen.

Man beobachtet eine Abweichung, die mit zunehmendem Emitterschichtwiderstand stärker wird.. Die Erklärung für den Unterschied erhält man, wenn man aufzeichnet, wie sich bei der 4-Spitzenmessung der Messwert bei wiederholter Messung (Aufsetzen der Spitzen) verhält (Abb. 12).

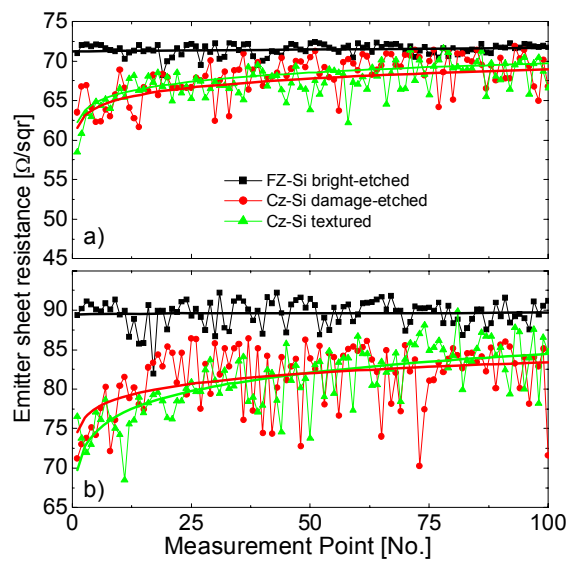


Abb. 12: Wiederholte Messungen mit der 4-Spitzenmethode.

Bei strukturierten Oberflächen erhält man eine asymptotische Annäherung an einen Endwert. Dies lässt sich durch eine sukzessive Einebnung durch häufiges

Aufsetzen der Spitzen verstehen. Diese Interpretation bestätigt der Vergleich der asymptotisch erreichten Werte mit der induktiven Methode (Abb. 13).

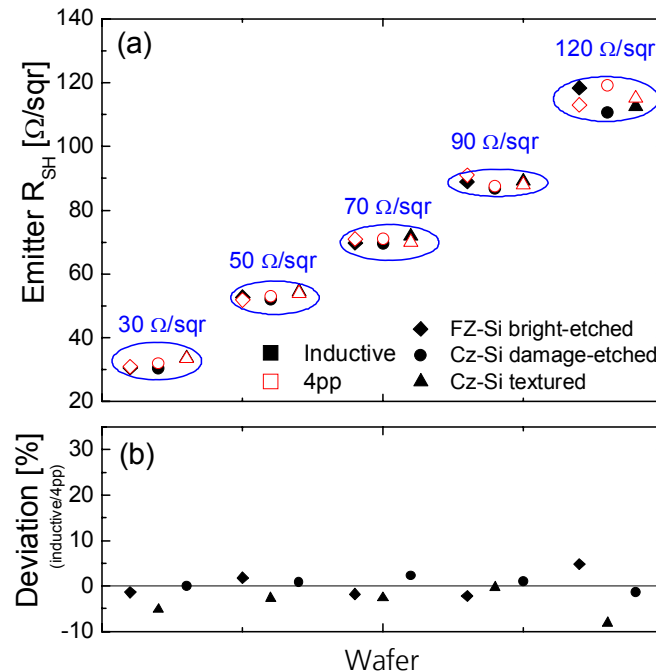


Abb. 13: Vergleich nach sukzessivem Aufsetzen gemäß Abb. 12: Die Abweichung der Methoden liegt jetzt unter 2%.

Um verlässliche Werte in der Produktion zu erhalten, ist die Reproduzierbarkeit ein sehr wichtiges Kriterium. Daher wurde der Vergleich der beiden Mess-techniken an unterschiedlich diffundierten glanzgeätzten Wafern im Abstand von zwei Monaten dreimal wiederholt. Die Ergebnisse zeigt Abb. 14.

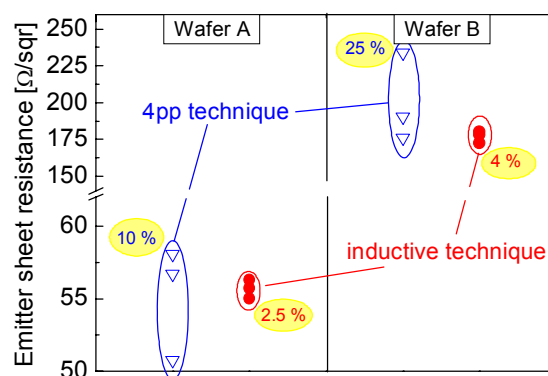


Abb. 14: Reproduzierbarkeit der Messverfahren im Vergleich

Während die Reproduzierbarkeit der 4-Spitzen-Messung bei nur 10% bis 25% liegt, abhängig vom Schichtwiderstand, erreicht die induktive Methode

mit 2-4% gute Werte. Insgesamt konnte die induktive Messung als taugliche Methode qualifiziert werden. Versuche, den für alle Messungen eingesetzten Vergleich vor und nach der Emitterdiffusion zu vermeiden, der in der Produktion eine wesentliche Einschränkung darstellt, führten allerdings während der Laufzeit des Projekts nicht zu einem einsatzfähigen Resultat.

3.4 Vergleiche mit IR-Kamera basierten SRI-Messungen

Wie bereits erwähnt, hatte sich bei der SRI (Sheet Resistance Imaging) Methode für Wafer mit industrierelevanten, unterschiedlich und potentiell lateral inhomogen strukturierten Oberflächen eine Unterscheidung zwischen optischen und elektrischen Einflüssen als ein kritisches Problem herausgestellt. Vergleiche von SRI zu Wirbelstrom- und Vier-Spitzen-Messung wurden durchgeführt. Ein Beispiel zeigt die folgende Abbildung.

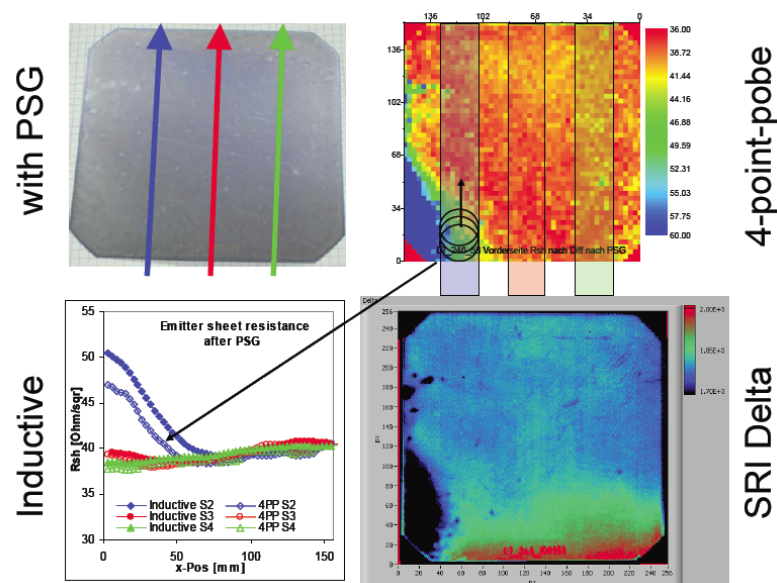


Abb. 15: Vergleich verschiedener Schichtwiderstands-Messverfahren

Zwar lässt sich in vielen Fällen, wie dem hier dargestellten eine Schichtwiderstands-Inhomogenität mit der SRI mit hoher Ortsauflösung berührungslos darstellen. Ein Verfahren zur sicheren Abgrenzung von optischen Artefakten konnte jedoch nicht entwickelt werden. In jedem Fall ist auch bei der SRI der Vergleich zwischen Messung vor und nach der Emitterdiffusion essentiell.

4 Schnelle Thermographie: Shunts und Hot-Spots

Während des Projektes war, getriggert durch den Einsatz von umg-Silicium, die Frage der Rückwärtsdurchbrüche von Solarzellen ein wichtiges Forschungsthema geworden. Wir konnten in materialorientierten Untersuchungen (im Projekt SolarFocus) wesentliche Beiträge zur Klärung der Ursachen einbringen. Die Frage nach einer schnellen, möglichst produktionsnahen Kontrolle der Ortsverteilung von Rückwärtsdurchbrüchen wurde für die Produktionskontrolle ein bedeutendes Thema und daher neben der Abbildung der Verluste in Vorwärtsrichtung in Kurzschlüssen (Shunts) ein wichtiger Arbeitspunkt dieses Projekts. Shunts und Rückwärtsdurchbrüche lassen sich im ersten Ansatz durch den Kontrast feststellen, den sie in Wärmebildern verursachen. Quantitative Aussage über die Bedeutung von lokalen Wärmequellen waren bisher jedoch nicht möglich. Wir haben daher zunächst eine umfassende Analyse der Mechanismen durchgeführt, die zu einer lokalen Signalerhöhung im Thermographiebild führen. Mit Hilfe gezielt hergestellter, gut definierter Punktquellen und deren Beschreibung konnten wir eine Basis gewinnen, die uns gestattet, quantitative Aussagen über die Nachweisbarkeitsgrenzen bei auf schnelle Detektion optimierten Messungen zu treffen.

Mit der Ultra-Fast DLIT (Dark Lock-In Thermography) gelang uns die Einführung einer In-Line-tauglichen Detektion lokaler Wärmequellen. Wir haben eine ausführliche Analyse der Einflussfaktoren und der erreichbaren Sensitivität durchgeführt. Damit konnten wir eine Ausführungsvorschrift für eine exakte Klassifizierung von Hot-Spots bei einer Messzeit von 10 ms und Detektionsgrenze von 60 mW lokaler Leistungsdissipation erarbeiten. Die praktische Einsetzbarkeit der Ultra-Fast DLIT wurde untersucht. Anfängliche Probleme konnten durch ein vierstufiges Auswerteverfahren überwunden werden, bei dem die Kalibrierung getrennt durchgeführt und die Flächen für die Auswertung durch geeignet gewählte Boolesche Masken, die automatisch erstellt werden können, definiert werden. Die Detektionsgrenzen für Punkt- und Flächenshunts wurden unter realistischen Bedingungen und für sehr kurze Messzeiten im Bereich von 10 ms ermittelt.

4.1 Modellshunts zur Quantifizierung der lokalen Wärmeentwicklung

Bei der anfänglichen Erhebung wichtiger Problemfelder hatte sich großes Interesse der Industrie daran gezeigt, welche Möglichkeiten im Vergleich zwischen Thermographie-Methoden und Lumineszenzmessungen bestehen, einzelne Problempunkte einer Zelle zu erkennen. Im folgenden Kapitel wird hierzu die Seite der Thermographie mit Schwerpunkt auf Quantifizierbarkeit bei minimaler Messzeit untersucht. Ein erster Schritt war die Untersuchung sehr gut definierter, gezielt hergestellter Shunts. Ein Beispiel für die Erkennbarkeit von Shunts ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

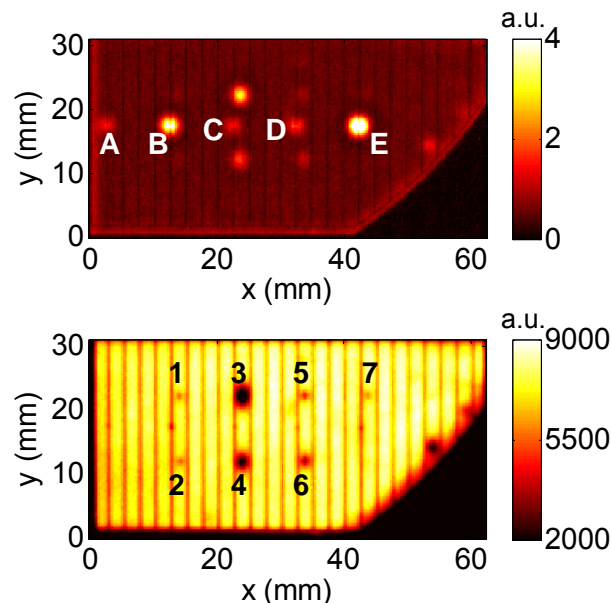


Abb. 15 Vergleich der Messbarkeit von Shunts zwischen und unter den Gridlinien, im oberen Bild gemessen mit Hellthermographie (ILIT) im unteren Bild mit Photolumineszenz (PL).

Die Shunts wurden gezielt mit Laserbeschuss hergestellt. Shunts in Gebieten mit niedrigem Serienwiderstand (Metall) erzeugen nur schwache Features in PL Bildern. Das sind aber gerade die für den Wirkungsgrad entscheidenden Problempunkte. Da die PL Shunts nur über die prinzipiell nicht-lokale erniedrigung der Spannung am Shunt darstellt, ist für Detektion von Kurzschlüssen generell die Thermograohie im Vorteil.

In der ersten Projektphase wurde außerdem zur Weiterentwicklung der experimentellen Möglichkeiten für ILIT ein Prototyp einer Kontaktiereinheit zur Messung an der thermisch frei schwebenden Zelle entwickelt, für den ein optimierter Chuck neu konzipiert und bestellt wurde.

4.2 Quantifizierung der Leistungsbeiträge im ILIT-Signal

In einer detaillierten Studie wurden die Modellvorstellungen darüber, welche Verlustmechanismen wie stark zur Hintergrund- bzw. zur örtlich erhöhten Verlustleistung bei einer ILIT-Messung beitragen, theoretisch zusammengestellt und experimentell überprüft. Einen Überblick über die Mechanismen der Hintergrundverlustleistung gibt die Abb. 16.

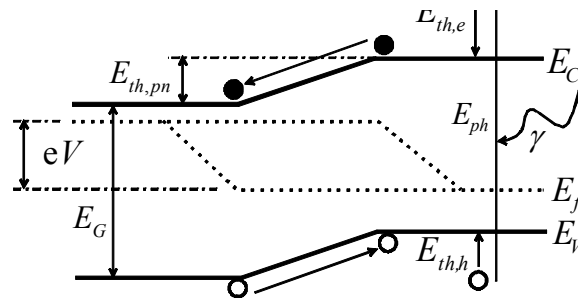


Abb. 16: Energieverlustanteile bei einer ILIT-Messung: Optische Anregung mit E_{ph} , Thermalisierung zur Bandkante mit $E_{th,e/h}$, und über den pn-Übergang mit $E_{th,pn}$ bei angelegter Spannung V .

Die lokalen Verlustmechanismen, Thermalisierung von optisch erzeugten Ladungsträgern zu den Bandkanten P_{th} und über den pn-Übergang P_{th-pn} , die eine homogene Erwärmung der Probe bewirken, konnten quantitativ am Experiment bestätigt werden. Als Beispiel wird im Folgenden die Hintergrundverlustleistung beim Übertritt über den pn-Übergang beschrieben. Dieser Anteil ist von der angelegten Spannung abhängig (s. Abb. 16), ein Messergebnis zeigt Abb. 17.

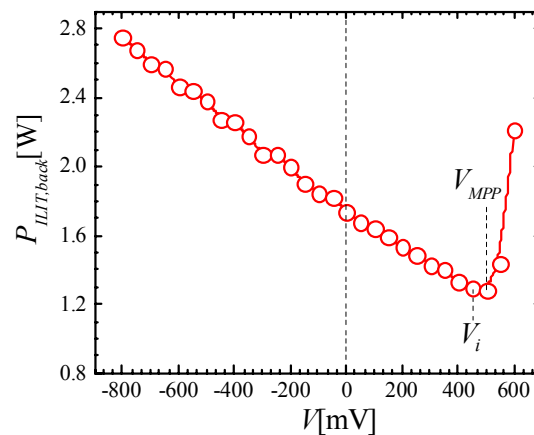


Abb. 17: Gemessene Spannungsabhängigkeit des Hintergrundanteils $P_{ILIT,back}$ des ILIT-Signals.

Es konnte gezeigt werden, dass die Abhängigkeit von $E_{th,pn}(V)$ die beobachtete Spannungsabhängigkeit über einen weiten Bereich unterhalb V_{MPP} quantitativ beschreibt.

Wichtig für die Bewertung von an Produktionszellen aufgenommenen ILIT-Bildern ist die Zuordnung eines quantitativen Leistungsverlustes zu beobachteten Signalerhöhungen. Hierzu wurden absichtlich erzeugte, gut definierte Shunts benutzt (Abb. 18, s. auch Abb. 15).

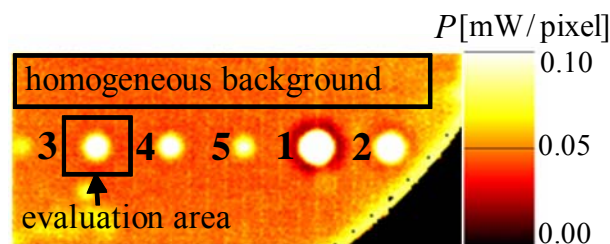


Abb. 18: Beispiel eines für die Quantifizierung von Leistungsverlusten benutzten Shunts.

Unter der Annahme, dass für die Spannung am Shunt die angelegte Spannung angenommen werden darf, kann unter Abzug der Hintergrundleistung die Leistung am Shunt angegeben werden:

$$P_{sh}(V) = \frac{1}{R_{sh}} \cdot V^2$$

Die genauesten Ergebnisse lassen sich durch eine Anpassung dieser quadratischen Abhängigkeit erhalten. Ein Beispiel für Messergebnisse zeigt Abb. 19.

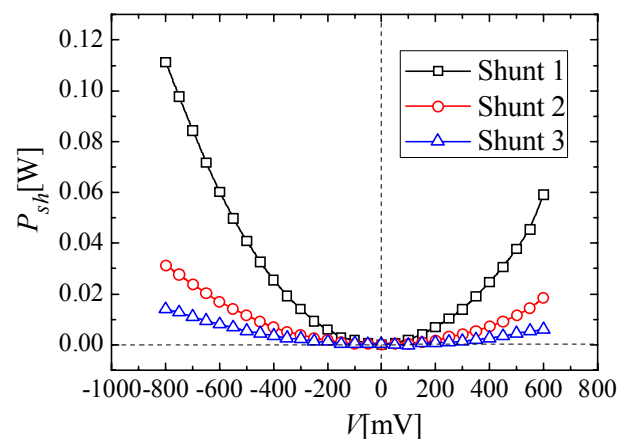


Abb. 19: Gemessene Spannungsabhängigkeit der Verlustleistung an verschiedenen Shunts.

Beim Vergleich der erhaltenen Absolutwerte mit einer anderen, von Ramspeck et al. veröffentlichten Methode [7] konnte eine gute Übereinstimmung festgestellt werden:

Shunt No.	1	2	3	4	5
	$R_{sh}[Ω]$	$R_{sh}[Ω]$	$R_{sh}[Ω]$	$R_{sh}[Ω]$	$R_{sh}[Ω]$
$P_{sh}(V)$ - Methode	6.0	20.5	50.5	63.9	115.5
Methode [7]	6.1	21.7	54.4	63.3	109.2

Die vollständigen Ergebnisse wurden auf der EU-PVSEC in Valencia 2008 [8] sowie in [9] veröffentlicht.

4.3 Messmethode Ultra-Fast-DLIT

Kurze Messzeiten können mit IR-Methoden bei hoher Rückwärtsspannung realisiert werden. Für das Beispiel eines Shunts von $100\ Ω$ erhält man bei Standard-DLIT mit $-0.5\ V$ $2.5\ mW$, bei Ultra-Fast-DLIT bei $-10V$ $1000\ mW$, d.h. eine Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses um den Faktor 400 und eine entsprechende Möglichkeit zur Verkürzung der Messzeit. Die Methode der Ultra-Fast-DLIT arbeitet mit nur einer Lock-In Periode (Abb. 20) und wurde im Projekt zunächst an absichtlich hergestellten Shunts demonstriert.

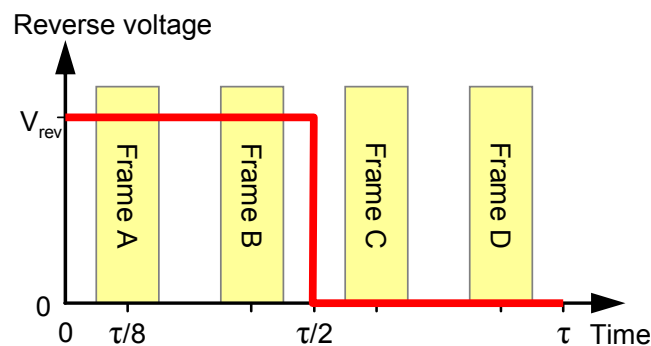


Abb. 20: Prinzip der Ultra-Fast-DLIT. Die Frames liefern jeweils die Werte Φ_{xy} .

Bei dem Verfahren werden kurze, z.B. $5\ ms$ lange Spannungspulse mit bekannter Rückwärtsspannung an die Zelle angelegt und der daraus resultierende externe Strom gemessen. Nun werden 4 synchronisierte Bilder (Signale S) wie in Abb. XX dargestellt mit der IR-Kamera aufgenommen.

Das Messsignal ergibt sich zu:

$$S_{xy} = \frac{1}{4} (\Phi_{xy}^B + \Phi_{xy}^C - \Phi_{xy}^A - \Phi_{xy}^D)$$

Die Kalibrierung auf die lokale Leistung

$$P_{xy} = K S_{xy}$$

erfolgt mit der Kalibrierkonstante

$$K = \frac{V_{rev} I_{rev}}{\sum_{i,j} S_{ij}}$$

Das Verfahren wurde mit Hilfe der absichtlich hergestellten Shunts (s. oben) überprüft. Die in dem in 10 ms erhaltenen auf Leistung kalibrierten Bild erhaltenen Werte (s. Abb. 21) stimmen gut mit den über die Parabelanpassung an den Spannungsverlauf ermittelten genauen Werten überein.

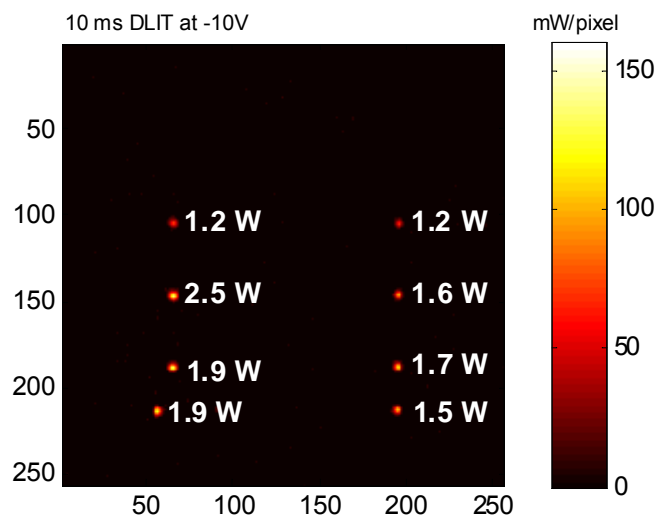


Abb. 21: Mit dem UF-DLIT-Verfahren ermittelte Werte für den Leistungsverlust an absichtlich eingebrachten Shunts.

Damit konnte die verlässliche Detektion von Hot-Spots in 10 ms mit niedrigen Leistungsverlusten im Bereich von 1-2 W zunächst prinzipiell demonstriert werden. Ergebnisse wurden in [10] veröffentlicht. Die genauere Untersuchung der praktischen Anwendbarkeit der Methode erfolgt in Abschnitt 4.5.

4.4 Wärmeumverteilung auf Solarzellen in Rückwärtsschaltung

Teilabschattung von Modulen verursacht hohe Rückwärtsspannungen in abgeschatteten Zellen. Tritt an diesen Zellen lokal eine hohe Wärmeentwicklung („Hot Spots“) aufgrund lokalisierter Rückwärtsdurchbrüche auf, kann dies zur Schädigung des Moduls führen. Um Schäden am Modul durch frühe Erken-

nung von „Hot Spots“ vermeiden zu können, stehen zur Detektion an den Produktionszellen verschiedene Messmethoden zur Verfügung:

UF-DLIT: mittlere Auflösung, sehr schnell (s. vorhergehender Abschnitt)

EL: sehr hohe Auflösung, langsam, kostengünstig

IR-Kamera: niedrige Auflösung, langsam, kostengünstig

Um herauszufinden, wie die jeweils erhaltene Information mit der tatsächlichen Wärmeverteilung auf der Solarzelle korreliert und damit die Frage beantworten zu können, wo wirklich Schäden auftreten könnten, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Messmethoden verglichen. Als Beispiel ist in Abb. 22 eine DLIT-Messung dargestellt, mit der in sehr kurzer Zeit ein Hot-Spot (roter Punkt) erkannt werden kann.

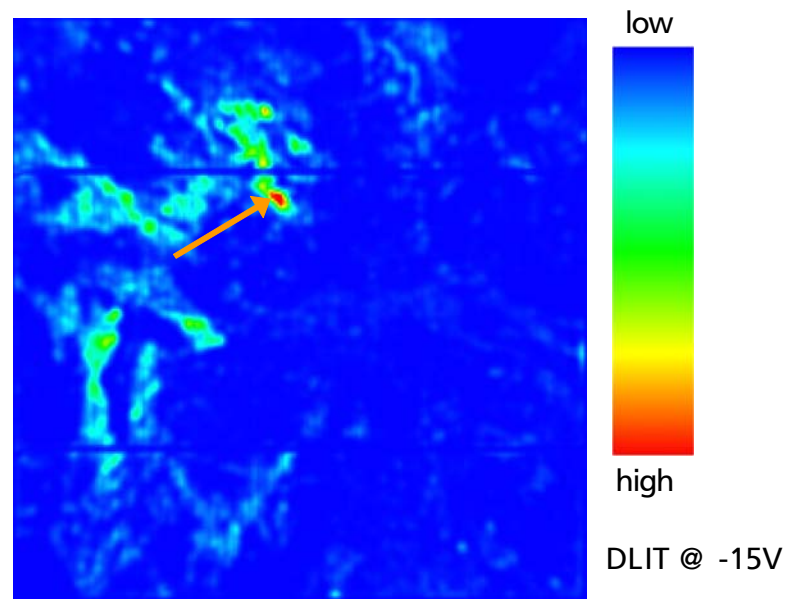


Abb. 22: Beispiel zur Erkennung eines Hot-Spots auf einer DLIT-Aufnahme

Diese Untersuchungen ergaben, dass die Detektion potentieller Hot Spots mittels DLIT und auch mit EL gut möglich ist. Die tatsächliche Wärmeverteilung im Modul ist aber auch abhängig z.B. von Geometrie und Zuleitungswiderstand, so dass für sich alleine die heißesten Stellen der DLIT-Aufnahmen nicht unbedingt die wärmsten Stellen im Modul verraten. Ein Vorschlag wäre daher, eine Berechnung der tatsächlichen Wärmeverteilung aus UF-DLIT-Messung durchzuführen.

4.5 Praktische Durchführung der schnellen Detektion von „Hot-Spots“ mit UF-DLIT

Da die wichtigen Stellen unter dem Gesichtspunkt der Hot-Spot-Detektion diejenigen mit hoher Wärmeentwicklung sind, wurde eine einfache, aber sehr schnelle Methode entwickelt, diese Stellen abzubilden (s. 4.3).

In den ersten Untersuchungen wurden klare Hinweise gefunden, dass der Rückwärtsstrom I_{rev} , der mangels besserer Möglichkeiten üblicherweise zur Qualifizierung des Rückwärtsverhaltens einer Solarzelle herangezogen wird, kein gutes Maß für das eigentlich wichtige Auftreten von Hot-Spots bei niedrigen Rückwärtsspannungen ist, weil die Wärmeerzeugung in keinem Fall homogen ist. Es kann sowohl bei global unbedenklichem niedrigen I_{rev} bereits zu hoher Leistungsdissipation in einzelnen Hot-Spots kommen als auch trotz hohem I_{rev} und damit global recht hoher Verlustleistung eine relativ lateral homogen verteilte Stromdichte ohne hohe örtliche Maxima vorliegen. Ortsaufgelöste Messungen sind daher von hohem Nutzen, Hierzu wurde die Ultra-Fast-DLIT als neue Methode eingeführt. Fragen der praktischen Erreichbarkeit der für In-Line-Anwendung erforderlichen hohen Geschwindigkeit sowie der gleichzeitig ausreichend quantitativen Bestimmung der lokal dissipierten Leistung werden im folgenden weiter untersucht.

Bei der Realisierung der vorgeschlagenen Methode an praktischen Zellen erwies sich zunächst die Erzielung der erforderlichen Genauigkeit als schwierig. Es traten hohe lokale Schwankungen der Kalibrierkonstanten auf, da die Unterscheidbarkeit der Hot-Spots von der direkten Umgebung zwar gut ist, aber die Gesamtheit der Schwankungen des Hintergrundes über die Probe bei der kurzen Messzeit zu hoch wird.

Zur Lösung wurde eine Vier-Stufen-Prozedur entwickelt:

1. DLIT-Messung
2. Potentielle Hot-Spots finden und Masken definieren
3. Kalibrierfaktor berechnen
4. Shunts/Durchbrüche quantitativ auswerten

Um im Schritt 2 potentielle Hot-Spots zu lokalisieren werden Schwellwerte mit Hilfe eines Filters (z.B. moving avg.) definiert. Dann werden die gefundenen Bereiche auf 2 thermische Diffusionslängen aufgeweitet um die gesamte Fläche, auf die Wärme dissipiert wird, mit einzubeziehen und für diese Flächen entsprechende Boolesche Masken erstellt. Die Bestimmung der Kalibrierkonstante (Schritt 3) kann bei einem Batch bzw. sogar bei einer bestimmten

Technologie einmalig mit hoher Genauigkeit erfolgen, Voraussetzung ist hier nur die Konstanz der Emissivität.

Für das erzielbare Detektionslimit muss zwischen Punkt- und Flächenshunts unterschieden werden:

Punktshunt	Flächenshunt
Kriterium: thermische Diffusionslänge Λ	
Shunt-Fläche $< 4\Lambda^2$	Shunt-Fläche $> 4\Lambda^2$
Wärmeverteilung belegt immer gleiche Fläche	Fläche steigt proportional zu Shunt-Fläche
Empfindlichkeit konstant	Empfindlichkeit \sim Fläche

Um eine realistische Aussage zu erhalten wurden Messungen für verschiedene Zeiten mit Auflösungen entsprechend der moderner Kameras für eine $156 \times 156 \text{ mm}^2$ -Zelle durchgeführt (Abb. 2 a).

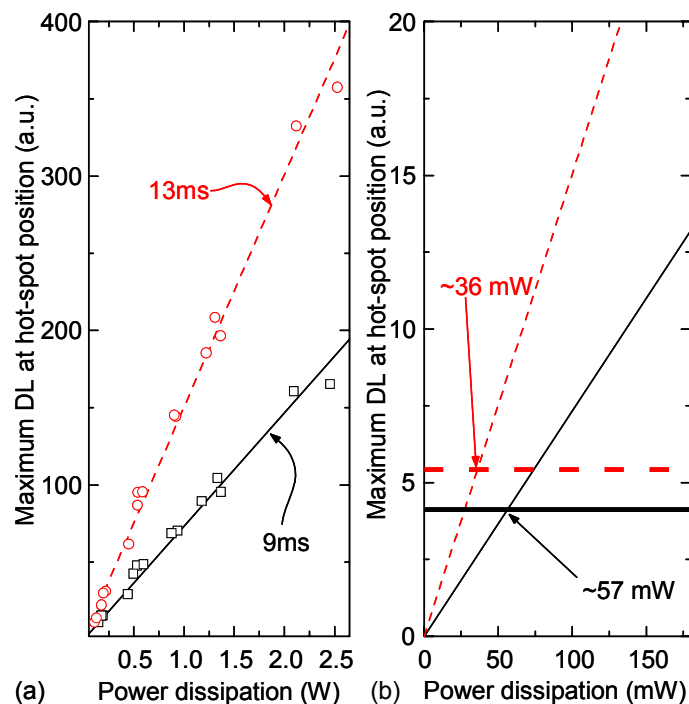


Abb. 23: (a) Gemessene Leistung bei zwei verschiedenen Messzeiten, (b) daraus ermittelte Detektionsgrenzen.

Ein Punktshunt, der in der globalen Kennlinie eine Leistungsdissipation von 57 mW erzeugt, kann damit innerhalb von 10 ms detektiert werden. Bei 13 ms

Messzeit reduziert sich die Grenze auf 36 mW. Daraus kann die erreichbare Genauigkeit abgeschätzt werden (Tabelle 1).

	9 ms	13 ms
Detection limit		
Power	57 mW	36 mW
I_{rev} @ -10V	5.7 mA	3.6 mA
R_{shunt} @ -10V	1750 Ω	2780 Ω
10% accuracy limit		
Power	670 mW	550 mW
I_{rev} @ -10V	67 mA	55 mA
R_{shunt} @ -10V	150 Ω	180 Ω

Tabelle 1: Detektionsgrenzen und Genauigkeit bei der Messung von Solarzellen mit $156 \times 156 \text{ mm}^2$ abgebildet auf 288×288 pixel.

Für einen flächigen Shunt wird die Detektionsschwelle abhängig von der Shuntgröße (Abb. 24).

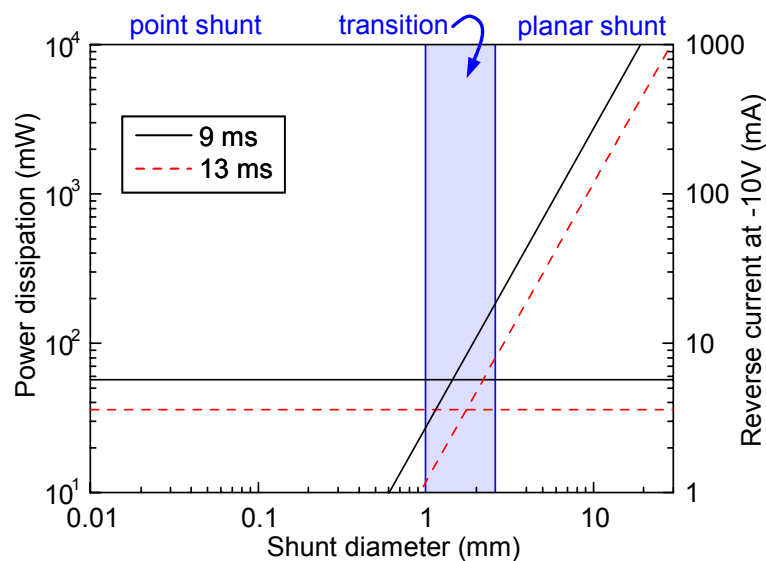


Abb. 24: Leistungsdissipation bei Punkt- und Flächenshunts bei der Messung von Solarzellen mit $156 \times 156 \text{ mm}^2$ abgebildet auf 288×288 pixel.

Für das Ziel einer effektiven Isolierung von Hot Spots kann Laser-Isolation eingesetzt werden. Probleme treten durch eine sehr schwierige Parameter-Wahl und insbesondere bei Auftrennen von Metallisierung auf. Als eine alternative kostengünstige Lösung wurde Hochgeschwindigkeitsschleifen getestet. Vorteile sind, dass das Verfahren sehr einfach automatisierbar ist und dass der Emitter lokal komplett entfernt wird. In einem Beispiel (Abb. 25) wurde dadurch die Verlustleistung um über einen Faktor 100 reduziert.

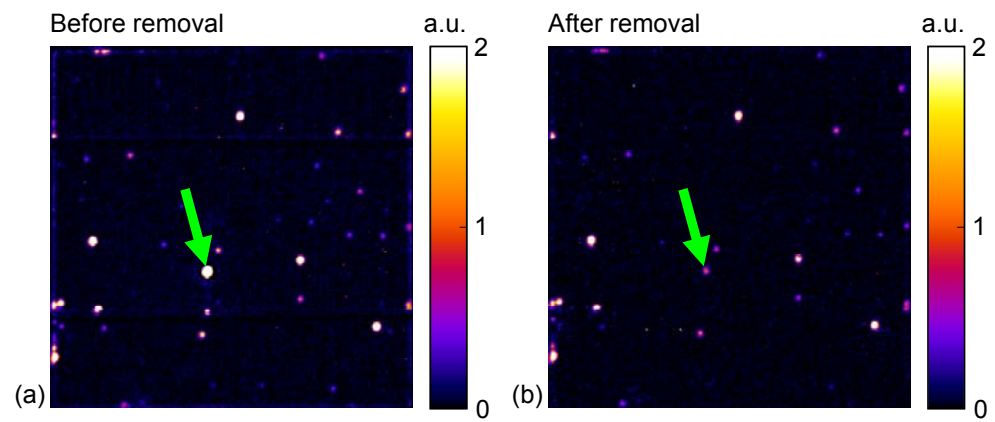


Abb. 25: Beispiel zur Entfernung eines starken Kurzschlusses (Pfeil) durch Hochgeschwindigkeitsschleifen

Der durch das Schleifen selbst induzierte Schaden wurde experimentell ermittelt. Daraus erhält man, dass lokale Shunts $< 4 \text{ k}\Omega$ sinnvoll entfernt werden können.

5 Abbildung von Serienwiderstandsverteilungen

5.1 Einführung

Ortsaufgelöste Serienwiderstandsmessungen sind ein wichtiger Baustein in der Prozesskontrolle, da ein globaler Serienwiderstandswert zwar ausreichend ist, um zu entscheiden, ob ein Serienwiderstandsproblem vorliegt oder nicht, er liefert jedoch keine Aussage über die Gründe des Problems. Ortsaufgelöste Methoden hingegen geben sofort Aufschluss über die Ursachen, da jedes Problem ein spezielles zweidimensionales Muster besitzt. Eine computergesteuerte Bildanalyse könnte anhand dieser Muster in Zukunft automatisiert Bilder auswerten. Gerade Lumineszenzmethoden haben durch ihre Schnelligkeit zudem das Potential in der Produktionslinie eingesetzt zu werden. Hierbei wird jede hergestellte Zelle vermessen. Prozessprobleme könnten sofort erkannt und gezielt gelöst werden. Dafür werden allerdings quantitativ verlässliche Ergebnisse benötigt, damit entschieden werden kann, welchen Einfluss der beobachtete erhöhte Serienwiderstand tatsächlich auf den Zellwirkungsgrad hat.

Die Basis für die Bestimmung des Serienwiderstandes aus einem Lumineszenzbild ist folgender Zusammenhang zwischen Lumineszenzsignal Φ_{xy} und lokaler Diodenspannung $U_{d,xy}$ (siehe dazu auch Einführung zu Kapitel 6):

$$\Phi_{xy} = C_{xy} \exp\left(\frac{eU_{d,xy}}{kT}\right) \quad (5.1)$$

Dabei ist C_{xy} ein zu bestimmende Kalibrationskonstante, abhängig vom Messaufbau und kT/e ist die thermische Spannung. Dieser Zusammenhang gilt für Elektrolumineszenz exakt, nicht jedoch für Photolumineszenz:

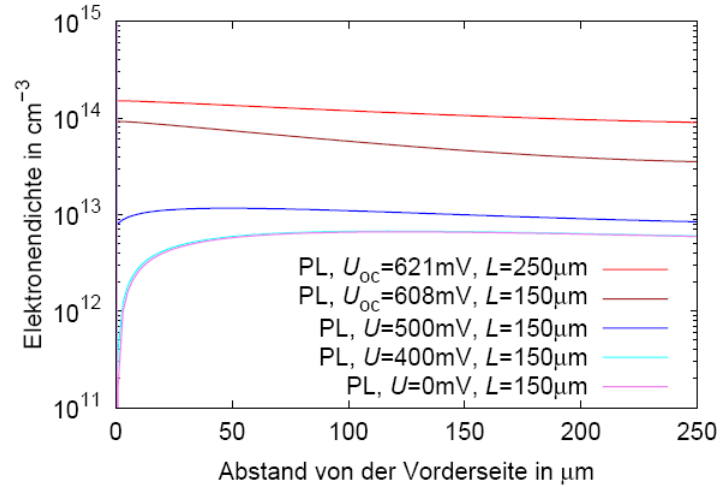


Abb. 26 Elektronendichte in Abhängigkeit der Wafertiefe für Photolumineszenz bei verschiedenen Spannungen und Diffusionslängen

Eine exponentielle Abhängigkeit der Überschussladungsträgerdichte von der Spannung ist nur nahe U_{oc} gegeben. Um diese auch bei kleineren Spannungen zumindest bis 400mV zu erhalten, kann das Tiefenprofil für $U = 0\text{V}$ (Kurzschluss) abgezogen werden [11]. Man zieht also in dieser Näherung den Teil des Profils ab, der nicht von der Spannung abhängt. In folgender Abbildung sind PC1D Simulationen hierzu gezeigt.

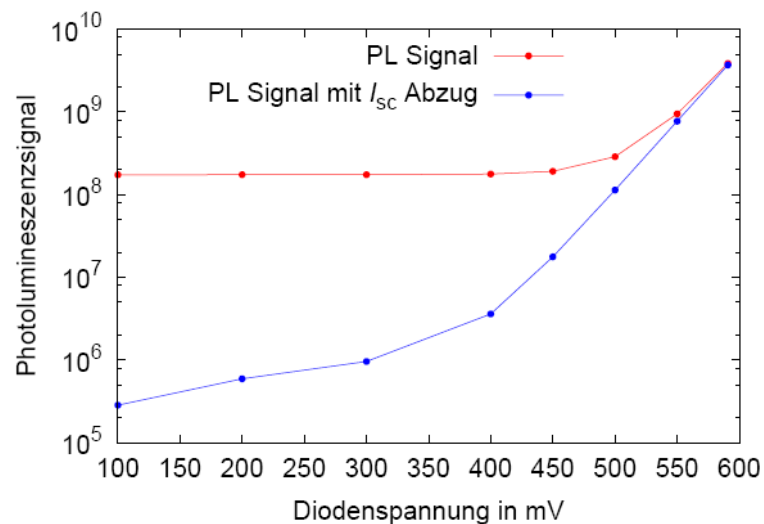


Abb. 27 PC1D Simulationen zum Abzug des spannungsunabhängigen Untergrundsignals bei PL. Das Photolumineszenzsignal (rot) ist nur nahe $U_{oc} = 591\text{mV}$ exponentiell von der Diodenspannung abhängig. Zieht man hingegen die Intensität unter Kurzschlussbetrieb ab, ergibt sich bis 400mV eine exponentielle Abhängigkeit (blau).

Damit ist die Anwendbarkeit des Zusammenhangs

$$\Phi_{xy} = C_{xy} \exp\left(\frac{eU_{d,xy}}{kT}\right)$$

für Serienwiderstandsmethoden gewährleistet, da bei Spannungen < 400mV nicht gemessen wird. [11]

Die Formel (5.1) wird bei allen Serienwiderstandsbestimmungen über Lumineszenz als Basis verwendet, deswegen sollen hier nochmals alle Annahmen aufgelistet werden, die in die Herleitung eingehen:

- Niederinjektionsbedingungen
- Vernachlässigung von Querdiffusion der Minoritäten in x- und y-Richtung
- Vernachlässigung der Abhängigkeit $\tau(\Delta n)$
- Diffusionskonstante nicht injektionsabhängig
- bei Photolumineszenz muss eine der folgenden Bedingungen erfüllt sein
 - sehr kleine Wellenlänge der Beleuchtungsquelle und damit Generation nur nahe der Vorderseite wegen kleiner Eindringtiefe der Strahlung (Anregung ähnlich zu EL)
 - Spannung nahe an der Leerlaufspannung
 - Abzug eines Bildes unter Kurzschlussbetrieb und Spannung > 400mV

5.2 Netzwerksimulationen mit LTSpice

An dieser Stelle sollen die elektrischen Netzwerk-Simulationen eingeführt werden, die in dieser Arbeit unterstützend und ergänzend zu den experimentellen Messungen durchgeführt wurden. Simuliert wurde mit dem kostenlosen Programm LTSPICE der Firma Linear Technology, das auf SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) basiert. Folgendes Netzwerkmodell bildete die Grundlage der Simulationen:

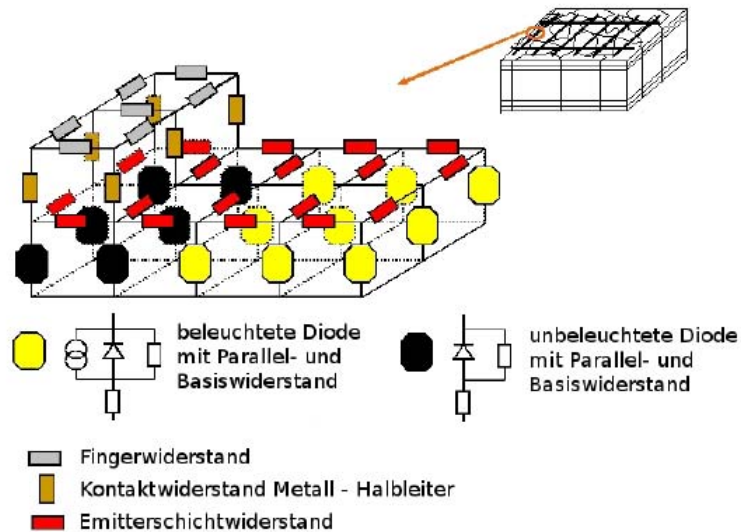


Abb. 28 Widerstandsnetzwerkmodell einer Solarzelle

Es ist ein kleiner Ausschnitt aus einer Solarzelle gezeigt. Die gelben Achtecke stellen beleuchtete Dioden dar, bestehend aus einer Stromquelle für die Stromgeneration durch Licht, einer Diode für die Rekombination, einem Parallelwiderstand zur Berücksichtigung von Shunts und dem Basiswiderstand. Die schwarzen Achtecke liegen unter einem Finger und haben deswegen keine Stromquelle, da kein Licht auf diese Bereiche kommt. Verbunden sind die einzelnen Elemente durch den Emitterschichtwiderstand. Der Strom aus den Stromquellen fließt durch den Emitter zum Finger hin. Dort muss er den Kontaktwiderstand zwischen Emitter und Finger und anschließend den Fingerwiderstand überwinden, um zum Busbar zu gelangen. Je nach Größe der einzelnen Widerstände und je nach Arbeitspunkt der Solarzelle verlaufen die Strompfade unterschiedlich und der Einfluss des Serienwiderstandes fällt unterschiedlich aus. Genau dieser Umstand macht Überlegungen zum Serienwiderstand kompliziert. Jedoch kann das Verhalten eines komplexen elektrischen Netzwerkes durch Simulationen untersucht werden.

Das Modell fußt auf der Annahme, dass das Eindiodenmodell auch lokal gilt. Zweidimensionale Effekte aufgrund des verteilten Serienwiderstandes lassen sich gut im Modell beschreiben. Simuliert werden die Ströme der Majoritäten in der Solarzelle. Um das Netzwerk mit LTSPICE zu lösen, trägt man alle Bauteile (Stromquellen, Dioden, Widerstände) mit ihren spezifischen Parametern in eine Textdatei ein. Zusätzlich werden jeweils die beiden Knoten angegeben, die mit einem Bauteil verbunden werden. Als Ergebnis kann man sich alle lokalen Ströme und Spannungen ausgeben lassen. Die lokalen Spannungen

bieten die Verbindung zu den experimentellen Ergebnissen, da diese, wie in Abschnitt 3.1 gezeigt, ebenfalls die lokalen Spannungen bestimmen. Die Auswertung hin zu Serienwiderstandsbildern kann dann genauso

durchgeführt werden, wie dies für die Lumineszenzmethoden definiert ist. Somit lassen sich durch Simulationen experimentelle Ergebnisse überprüfen und experimentell nicht zugängliche Fragestellungen untersuchen. Wenn nicht anders angegeben, wurden folgende Standardparameter für die Simulationen verwendet:

$$\rho_{\text{Emitter}} = 50\Omega$$

$$\rho_{\text{Kontakt}} = 3 \cdot 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$$

$$\rho_{\text{Finger / Bus}} = 3 \cdot 10^{-6} \Omega \text{cm}$$

$$A_{\text{Finger}} = 12,5\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$$

$$A_{\text{Bus}} = 12,5\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$$

$$\rho_{\text{Basis}} = 1,5\Omega \text{cm}$$

$$R_p \rightarrow \infty$$

$$J_0 = 1 \cdot 10^{-9} \text{mA} / \text{cm}^2$$

$$J_{\text{Licht}} = 36 \text{mA} / \text{cm}^2$$

Als Strukturen wurden immer Symmetrieelemente simuliert, die durch Aneinandersetzen die gesamte Solarzelle ergeben. Ein solches Symmetrieelement mit einem Finger ist in nachfolgender Abbildung zu sehen:

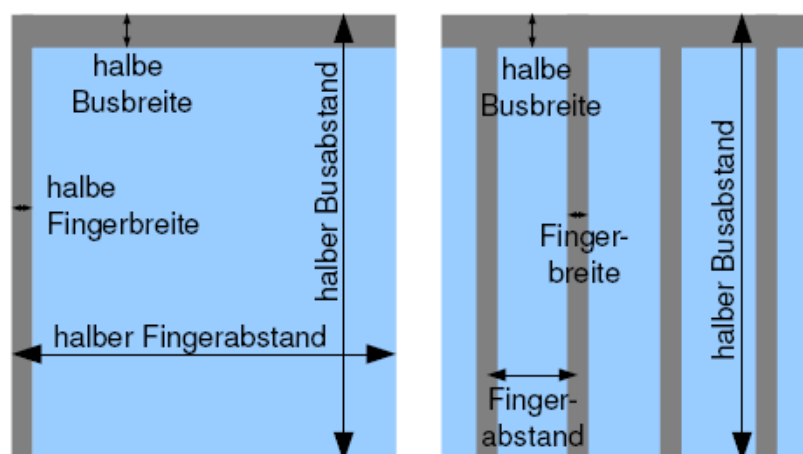


Abb. 28 Symmetrieelemente für Simulationen

Für die Simulation kontaktiert ein halber Finger/Busbar ein halbes Zwischenfingergebiet. Um ausgedehnte Serienwiderstandseffekte zu simulieren, wurde außerdem ein Symmetrieelement mit vier Fingern verwendet, welches in der Abbildung rechts gezeigt ist. In der folgenden Tabelle sind die Maße und Auflösungen der beiden Symmetrieelemente aufgelistet.

Abmessungen der beiden verwendeten Symmetrieelemente. Die x-Richtung verläuft parallel zum Bus, die y-Richtung parallel zum Finger. Die Maße entsprechen in etwa einer Solarzelle mit 125mm Kantenlänge.		
	1 Finger	4 Finger
Maße x-Richtung × y-Richtung in cm	0,136×3,168	1,152×3,168
Pixelmaße in x-Richtung × y-Richtung in μm	40×240	320×480
Auflösung x-Richtung × y-Richtung in Pixel	34×132	36×66
Auflösung Busbreite / Fingerbreite in Pixel	2 / 1	2 / 1

Bei der Simulation von multikristallinen Zellen ist zu beachten, dass in einer realen Solarzelle Ausgleichsströme der Minoritäten zwischen Bereichen unterschiedlicher Lebensdauer fließen. Diese folgen dem Konzentrationsgradienten und fließen daher von Bereichen hoher zu denen niedriger Lebensdauer. Diese Ströme werden im Netzwerkmodell nicht berücksichtigt. Daher können nur Lebensdauervariationen simuliert werden, die kleine Minoritäten-Ausgleichsströme zur Folge haben. Dies ist der Fall, wenn große Bereiche homogener Lebensdauer verwendet werden und die Unterschiede in der Lebensdauer nicht zu groß sind. Die hier verwendeten Strukturen sind stets größer als 1mm bei typischen Lebensdauervariationen um einen Faktor 100, weshalb der zu erwartende Fehler klein ist. Es ist zu beachten, dass Ausgleichsströme der Majoritäten über den Emitter sehr wohl in der Simulation berücksichtigt sind.

5.3 Der orts aufgelöste Serienwiderstand – Analyse der verfügbaren Lumineszenzmethoden

Bevor die experimentellen, lumineszenzbasierten Serienwiderstandsmessungen im nächsten Kapitel folgen, soll an dieser Stelle die Messgröße „lokaler Serienwiderstand“ unter die Lupe genommen werden. Zuerst beleuchtet ein Abschnitt die Definition, wie sie sich im letzten Jahr bei den Lumineszenzmethoden herauskristallisiert hat. Nachfolgend wird die Injektionsabhängigkeit untersucht, um geeignete Messparameter zu finden. Die Untersuchungen zum Einfluss von Lebensdauervariation im darauffolgenden Abschnitt ergeben wichtige Konsequenzen für die Messung von multikristallinen Zellen. Zum Abschluss des Abschnitts 5.3 wird auf die zentrale Fragestellung eingegangen, wie man einen R_s -Wert für die gesamte Zelle aus einem Serienwiderstandsbild erhält. Dies wird bei der quantitativen Auswertung der Bilder in Punkt 5.4 eine wichtige Rolle spielen.

Definition des Serienwiderstands im Netzwerk

In folgender Abbildung ist ein Netzwerkmodell mit beleuchteten Dioden an jedem Pixel zu sehen.

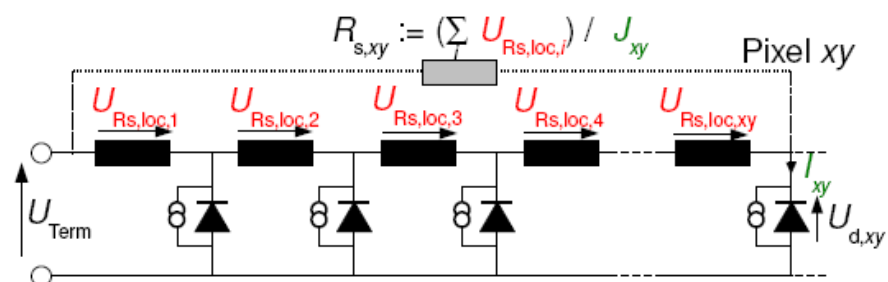


Abb. 29 Netzwerkmodell mit Definition von $R_{s,xy}$

Die einzelnen Pixel sind durch einen Widerstand verknüpft, dies kann z.B. der Emitterschichtwiderstand sein. Für den Pixel xy ist die Diodenspannung eingezeichnet. Die Spannung U_{Term} , die an den Kontakten anliegt, also am Terminal, ist ebenso bekannt. Somit kann der Spannungsabfall $U_{Rs,xy}$ zwischen Pixel xy und den Kontakten errechnet werden:

$$U_{Rs,xy} = |U_{d,xy} - U_{Term}|$$

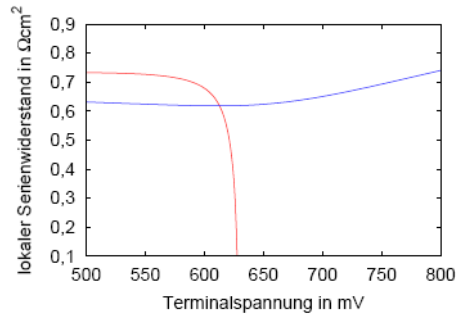
Zu beachten ist, dass die Formel nur mit den Betragsstrichen für EL und PL gültig ist. Im Falle der Elektrolumineszenz ist die Terminals Spannung größer als die lokale Diodenspannung und man muss $U_{d,xy}$ von U_{Term} abziehen, um einen positiven Spannungsabfall zu erhalten. Der Spannungsabfall $U_{R_s,xy}$ ist die Summe aller Spannungsabfälle an den lokalen Widerständen. Um zu einem Widerstand zu gelangen, benötigt man noch einen Stromwert. In den Publikationen zur R_s -Bestimmung mit Lumineszenz wurde eine Definition gewählt, die den lokalen Strom bzw. die lokale Stromdichte dafür verwendet.

Injektionsabhängigkeit

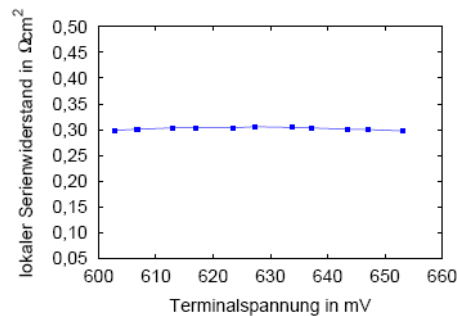
Ein so definierter lokaler Serienwiderstand zeigt kein ohmsches Verhalten. Dies wurde experimentell und mit Simulationen untersucht. Zur Bestimmung der Konstante C_{xy} für das Experiment wurde dabei ein Kalibrationsbild bei niedriger Injektion verwendet. Hier kann die Annahme $U_{\text{Term}} = U_{d,xy}$ für alle xy gemacht werden. Hierauf wird noch genauer bei den Methoden RESI und RsPL eingegangen. Bei Experiment und Simulation wurde ein homogenes und für Hell- und Dunkelfall gleiches J_0 angenommen. Dieses wurde aus den gemessenen Parametern J_{sc} und U_{oc} mithilfe des globalen Eindiodenmodells bestimmt:

$$J_0 = J_{sc} \cdot \exp(eU_{oc}/kT)$$

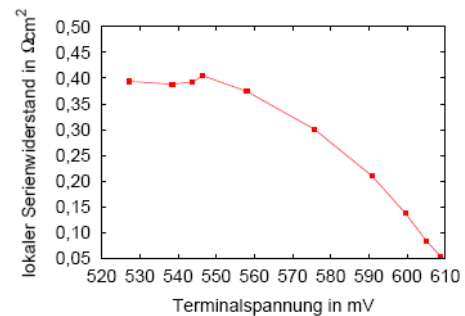
Nun kann der orts aufgelöste Serienwiderstand $R_{s,xy}$ in Abhängigkeit von der äußeren Spannung U_{Term} gemessen und simuliert werden. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Abbildung zu sehen.



(a) Simulation ohne (blau) und mit (rot) Beleuchtung



(b) Experiment ohne Beleuchtung



(c) Experiment mit Beleuchtung

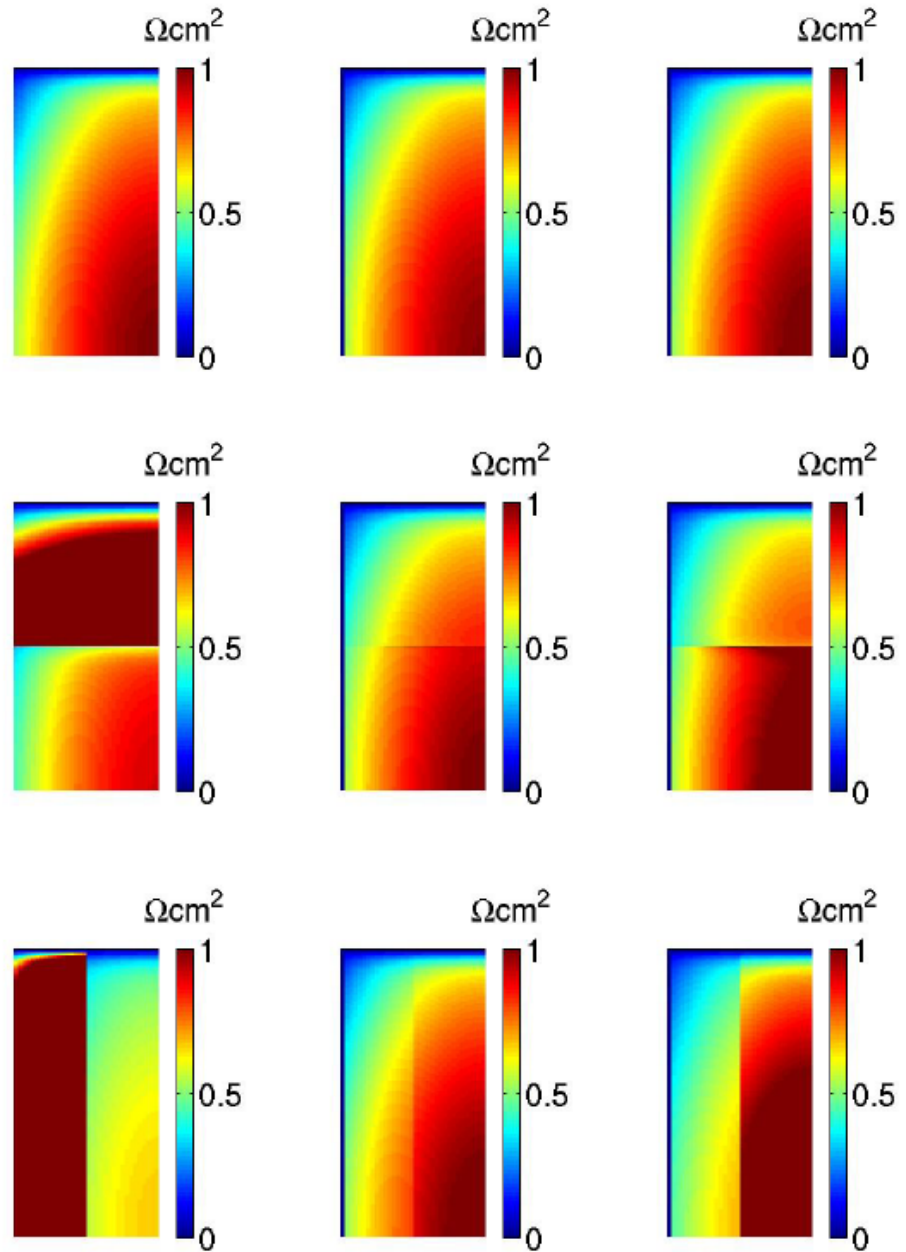
Abb. 30 Injektionsabhängigkeit des orts aufgelösten Serienwiderstandes

Sowohl beim Hell- wie auch beim Dunkelserienwiderstand gibt es einen konstanten Bereich bei kleinen Spannungen. In diesem Bereich sollte gemessen werden, damit die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Messungen gewährleistet ist. Der Anstieg des Dunkelwiderstandes zu großen Spannungen hin, lässt sich durch die stark ansteigende Leitfähigkeit der Dioden zwischen dem Pixel xy und dem Terminal erklären. Diese resultiert aus einer größer werdenden Diodenspannung nahe am Terminal. Die durch höhere Terminalspannung verursachten zusätzlichen Ströme fließen konsequenterweise nahe am Terminal ab und kommen nicht bis zum Pixel xy . Somit steigt der Strom durch den Pixel und somit auch die lokale Diodenspannung nicht mehr an. Dies spiegelt sich in einem steigenden $U_{R_s,xy}$ bei stagnierendem J_{xy} wider, was einen größer werdenden Serienwiderstand zur Folge hat. Die lokale Definition spiegelt also nicht das Verhalten der Definition des globalen Serienwiderstandes wider. Bei diesem wird eine Abnahme hin zu höherer Injektion festgestellt. Der Abfall des Hellserienwiderstandes hin zu U_{oc} resultiert aus dem sehr schnell kleiner werdenden Spannungsabfall. Dieses Verhalten ist schon vom globalen Serienwiderstand bekannt. Es sei hier darauf hingewiesen, dass der Verlauf im Hellen durch eine falsche Wahl der Dunkelsättigungsstromdichte J_0

anders verlaufen kann. Wird J_0 zu groß bestimmt, so sinkt der Strom J_{xy} sehr schnell und es kann zu einem Anstieg von $R_{s,xy}$ hin zu U_{oc} kommen.

Einfluss von Lebensdauerunterschieden

Neben der Injektionsabhängigkeit ist auch der Einfluss von Unterschieden in der Materialqualität v. a. für multikristalline Zellen wichtig. Lebensdauerunterschiede haben sowohl Einfluss auf die lokale Diodenspannung, als auch auf den lokalen Strom. Im Prinzip sind beide Parameter sehr eng miteinander verknüpft. Die Lebensdauer bestimmt den Dunkelsättigungsstrom und damit den Diodenwiderstand. Das Verhältnis von Serienwiderstand zu Diodenwiderstand bestimmt, ob der photogenerierte Strom durch die lokale Diode fließt (also rekombiniert) oder durch den Serienwiderstand zu den Kontakten. Das heißt, die Bedeutung des Serienwiderstandes ist durchaus abhängig von der Eigenschaft der lokalen Diode. Um Solarzellen charakterisieren zu können, ist es jedoch sinnvoll, beide Parameter getrennt voneinander zu bestimmen. Eine Serienwiderstandsmessung soll also nicht von der Lebensdauer beeinflusst sein und umgekehrt. Für die kamerabasierten Serienwiderstandsmethoden bedeutet dies, dass Kornstrukturen von multikristallinen Proben im Bild nicht zu sehen sein sollten und dass die absoluten Werte nicht von den Eigenschaften der lokalen Dioden abhängen sollten. Ist dies nicht der Fall, ist es bei der Analyse des Bildes schwierig zwischen einem durch Lebensdauervariationen induzierten Effekt und einem erhöhten Serienwiderstand aufgrund eines Prozessfehlers zu unterscheiden. Ein Hauptaugenmerk der orts aufgelösten Serienwiderstandsmessung ist jedoch die quantitative Analyse von Prozessfehlern. Da die experimentellen Ergebnisse in allen Methoden vereinfachende Annahmen machen, können diese für eine Analyse der Definition des orts aufgelösten Serienwiderstandes nicht verwendet werden. Deswegen sollen Netzwerksimulationen mit dem Symmetrieelement mit einem Finger hierfür verwendet werden. Da die Simulationen sowohl die Diodenspannung wie auch den lokalen Strom für jeden Pixel berechnen, sind keine weiteren Annahmen zur Berechnung von $R_{s,xy}$ notwendig. Für die Hälfte des Symmetrieelements mit hoher Lebensdauer wurde eine Dunkelsättigungsstromdichte von $J_{0,gut} = 10^{-9}$ mA/cm² gewählt, für die andere Hälfte $J_{0,schlecht} = 10^{-8}$ mA/cm². Dies entspricht einem Faktor 100 in der Lebensdauer. In nachfolgender Abbildung ist das Ergebnis für drei wichtige Arbeitspunkte und unterschiedlicher Orientierung der Korngrenze zu sehen.



(a) Dunkelfall $U_{\text{Term}} = U_{\text{mpp}}$ (b) Hellfall $U_{\text{Term}} = U_{\text{mpp}}$ (c) Hellfall bei 80% J_{sc}

Abb. 31 Simulation des Serienwiderstandes nach der Definition der Lumineszenzmethoden
 oben: Referenz mit hoher Lebensdauer, $U_{\text{mpp}} = 518\text{mV}$
 mitte: Korngrenze senkrecht zu Finger, niedrige Lebensdauer unten, $U_{\text{mpp}} = 475\text{mV}$
 unten: Korngrenze parallel zu Finger, niedrige Lebensdauer rechts, $U_{\text{mpp}} = 474\text{mV}$

Im Elektrolumineszenzfall sind die Ströme im Bereich niedriger Lebensdauer höher, die lokale Diodenspannung ist leicht erniedrigt, was zu erhöhtem $U_{\text{RS},xy}$ führt. Beide Effekte kompensieren sich jedoch nicht. Der Serienwiderstand ist

in schlechten Lebensdauerbereichen kleiner und in guten Bereichen größer im Vergleich zu einer bis auf die Lebensdauer gleichartigen Monozelle. Man sieht hier, dass die gewählte Definition für den Elektrolumineszenzfall nicht die gewünschten Ergebnisse liefert. Bei Photolumineszenz ist der Einfluss auf die Spannung im Messbereich (MPP bis 80% J_{sc}) sehr gering und wird erst zur Leerlaufspannung hin größer. Am MPP (ca. 95% J_{sc}) ist auch der Einfluss auf die Ströme noch gering. Diese sind im schlechten Bereich leicht erniedrigt aufgrund der höheren Rekombination. Bei höheren Spannungen (80% J_{sc}) werden diese in schlechten Gebieten immer kleiner, was sich in einem erhöhten Serienwiderstand niederschlägt. Für Photolumineszenz liefert die Definition also für kleine Spannungen Serienwiderstandswerte, die nicht von der Lebensdauer beeinflusst sind. Es sei zum Abschluss noch einmal betont, dass diese Ergebnisse von den experimentellen Methoden nur zum Teil reproduziert werden können. Diese basieren oft auf Annahmen, die das Ergebnis homogener aussehen lassen, als es bei einer perfekten Messung ohne Annahmen wäre. Der Grund, warum die Definition nicht nur den Serienwiderstand charakterisiert, ist in der Wahl der Parameter Spannung und Strom zu sehen, die in die Berechnung einfließen. Wäre der lokale Strom alleine für den Spannungsabfall verantwortlich, wie es im Modell unabhängiger Pixel angenommen ist, würden sich beide auch bei Variationen in der Lebensdauer an jedem Punkt perfekt kompensieren. In Wirklichkeit sind die Parameter eines Pixels xy jedoch abhängig von der Umgebung und allen Pixel auf dem Weg zu den Kontakten.

Methoden zur Bestimmung eines globalen Wertes aus Lumineszenzbildern

Mithilfe der Netzwerksimulationen sollen drei Mittelungsverfahren getestet werden. Erstens der harmonische Mittelwert ($R_{s,inv}$), zweitens der arithmetische Mittelwert ($R_{s,mean}$) und drittens ein Wert $R_{s,sim}$ der mithilfe einer Netzwerksimulation errechnet wird. Dafür werden die Hell- und die Dunkelkennlinie folgenden Netzwerkes simuliert:

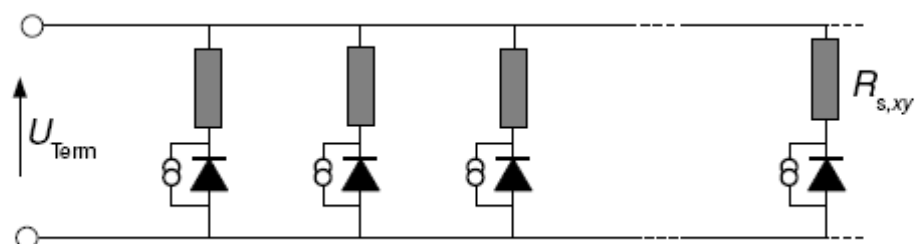


Abb. 31 Modell für den orts aufgelösten Serienwiderstand

Aus Hell- und Dunkelkennlinie am MPP wird dann wie üblich der Serienwiderstand berechnet.

Als Grundlage für den Vergleich der drei Mittelungsmethoden wird das Modell aus Abschnitt 5.2 verwendet. Simuliert wurde die 4-Finger-Struktur aus. Aus der Simulation der globalen Kennlinien erhält man durch den Vergleich von Hell- und Dunkelkennlinie einen Referenzwert $R_{s,mpp}$. Ferner kann mit dem Modell ein Serienwiderstandsbild am MPP nach der Definition der Lumineszenzmethoden generiert werden. Die Dunkelsättigungsstromdichte für die Simulationen wurde aus U_{oc} und J_{sc} berechnet. Auf das Bild kann man die drei Verfahren zur Bestimmung von $R_{s,inv}$, $R_{s,mean}$ und $R_{s,sim}$ anwenden. Um den Füllfaktor der Struktur zu erniedrigen, wurden Serienwiderstandsprobleme simuliert. Dafür wurde der Kontaktwiderstand an Teilen der Finger um einen Faktor 100 erhöht. Der Anteil mit erhöhtem Kontaktwiderstand wurde schrittweise vergrößert, sodass der Füllfaktor der Zelle immer niedriger wird. Nun kann die Korrelation der vier globalen Serienwiderstandswerte mit dem Füllfaktor untersucht werden. Dies ist in folgender Abbildung zu sehen.

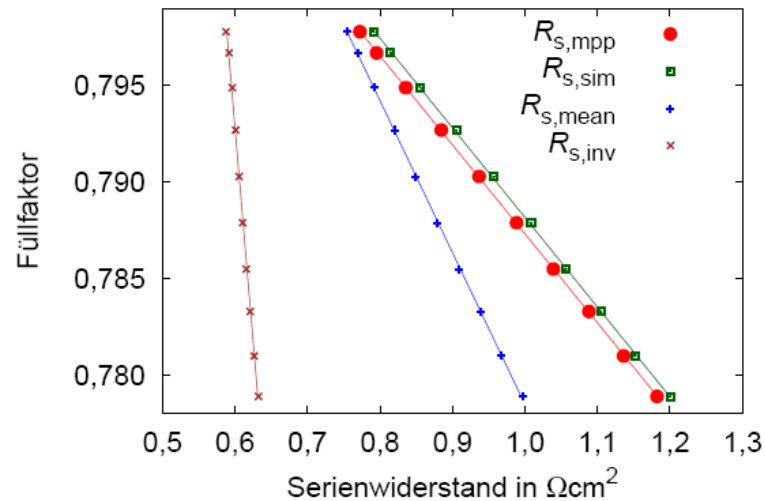


Abb. 32 Simulation zu erhöhten Kontaktwiderständen auf Monomaterial. Die Steigung des linearen Fits m_i ergibt die Korrelation des FF zu R_s .

$$m_{mpp} = 4,6\%/\Omega\text{cm}^2, m_{sim} = 4,6\%/\Omega\text{cm}^2, m_{mean} = 7,9\%/\Omega\text{cm}^2, m_{inv} = 44\%/\Omega\text{cm}^2$$

Theoretisch ergibt sich $m_{theo} = 4,6\%/\Omega\text{cm}^2$.

Theoretisch wird für die simulierte Zelle nach der Formel

$$FF = \frac{J_{mpp} U_{mpp}}{J_{sc} U_{oc}}$$

$$\delta FF = \frac{J_{mpp} U - J_{mpp} (U - \delta U_{mpp})}{J_{sc} U_{oc}} = \frac{J_{mpp}^2 \delta R_{s,mpp}}{J_{sc} U_{oc}}$$

$$\frac{\delta FF}{\delta R_{s,mpp}} = m_{theo} = \frac{J_{mpp}^2}{J_{sc} U_{oc}}$$

eine Korrelation zwischen Füllfaktor und Serienwiderstand von $4,6\%/ \Omega \text{cm}^2$ vorausgesagt. Der Referenzwert bestätigt diesen Wert. Sowohl die absoluten Werte $R_{s,sim}$ wie auch die Steigung m_{sim} zeigen gute Übereinstimmung zum Referenzwert.

Die Werte aus dem arithmetischen Mittelwert sind deutlich kleiner als die Referenzwerte und die Steigung ist größer. Hieran sieht man, dass für große Serienwiderstände diese Methode nicht gut geeignet ist. Das Bilden des arithmetischen Mittelwertes liefert gute Werte, wenn jeder Pixel ungefähr gleich viel Strom liefert, also gleich wichtig für die Zelleistung ist, und damit die Gleichgewichtung gerechtfertigt ist. Dies ist der Fall, wenn der Serienwiderstand R_s viel kleiner als der Diodenwiderstand R_d ist. Dann führen Variationen in R_s zu keinen nennenswerten Variationen im lokalen Strom.

Vor allem die Werte $R_{s,inv}$ liefern keine gute Übereinstimmung zur Referenz. Der Anstieg im Kontaktwiderstand führt hier nur zu kleinen Anstiegen im Wert $R_{s,inv}$, obwohl der Füllfaktor merklich beeinflusst ist. Dadurch ist die Korrelation zum FF deutlich anders als theoretisch erwartet. Die harmonische Mittelung ist durch die Gebiete kleinen Serienwiderstandes geprägt. Dies spiegelt die Natur einer realen Solarzelle unter Beleuchtung jedoch nicht wider. Durch die homogene Generation muss der Strom durch alle Bereiche der Solarzelle fließen, auch wenn der Serienwiderstand hoch ist.

Die vorhergehende Simulation nahm Material homogener Lebensdauer an. Nun wird noch eine Simulation mit zwei verschiedenen Lebensdauern auf der oberen und der unteren Hälfte des Symmetrieelementes durchgeführt. Dies resultiert in unterschiedlichen J_0 -Werten für die Dioden. Die obere Hälfte bleibt unverändert bei $J_{0,oben} = 10^{-9} \text{ mA/cm}^2$, die untere Hälfte wird auf $J_{0,unten} = 10^{-8} \text{ mA/cm}^2$ verschlechtert. In prinzipielles Problem der meisten Serienwiderstandsmethoden auf ultimaterial ist, dass die Lebensdauern a priori nicht bekannt sind. Man muss deshalb in homogenes J_0 annehmen, was zu einem Fehler führt, wie die folgenden Simulationen zeigen.

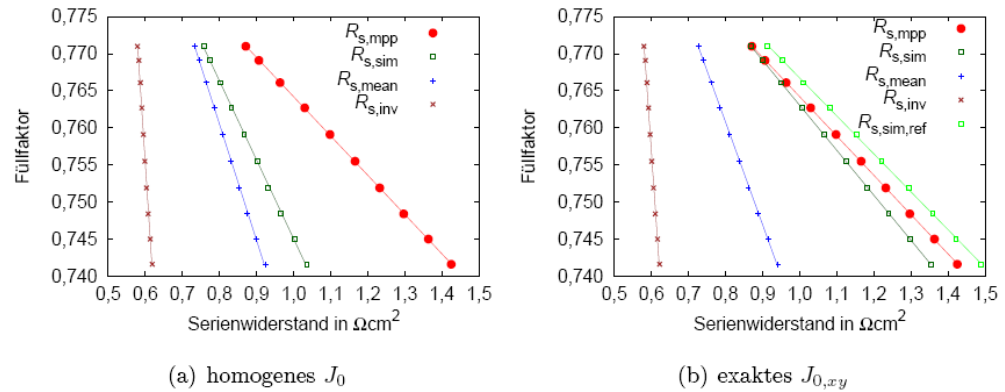


Abb. 33 Simulationen zu Kontaktwiderstandsproblemen auf Multimaterial. Die Steigung des linearen Fits m_i ergibt die Korrelation des FF zu R_s .

Bild (a): $m_{mpp} = 5,3\%/Ωcm^2$, $m_{sim} = 10,6\%/Ωcm^2$, $m_{mean} = 15,7\%/Ωcm^2$, $m_{inv} = 77\%/Ωcm^2$

Bild (b): $m_{mpp} = 5,3\%/Ωcm^2$, $m_{sim} = 6,1\%/Ωcm^2$, $m_{mean} = 13,8\%/Ωcm^2$, $m_{inv} = 73\%/Ωcm^2$, $m_{sim,ref} = 5,1\%/Ωcm^2$

Theoretisch ergibt sich $m_{theo} = 4,7\%/Ωcm^2$.

Es ist zu sehen, dass durch die Annahme eines homogenen J_0 die absoluten Werte und die Steigung schlechter werden im Vergleich zur Referenz. In den Simulationen ist das exakte orts aufgelöste J_0 natürlich bekannt und man kann auch dieses in die Berechnung miteinbeziehen. Dann ergeben sich die Kurven rechts in der Abbildung. Sowohl die absoluten Werte wie auch die Steigung verbessern sich deutlich. Wenn man den Strom nicht über die Diodengleichung berechnet, sondern den exakten Strom aus der Simulation für die Berechnung verwendet, erhält man die Werte $R_{s,sim,ref}$. Hier ist die Korrelation zum FF sehr nahe an der Referenz. Abschließend kann man sagen, dass die Werte $R_{s,sim}$ eine gute Übereinstimmung mit den global errechneten Werten besitzen. Bei Multimaterial führen die unbekannteren Lebensdauerunterschiede jedoch zu Abweichungen bei Methoden, die ein homogenes J_0 annehmen.

5.4 Praktischer Vergleich verschiedener experimenteller Methoden

Hinken et al [12]: RsEL

Hinken et al haben eine Methode zur Bestimmung des lokalen Serienwiderstandes vorgestellt, die auf spannungsabhängigen Elektrolumineszenzmessungen beruht. Diese wird im Folgenden RsEL genannt. Auf eine multikristalline Zelle angewendet ergibt sich folgendes Bild:

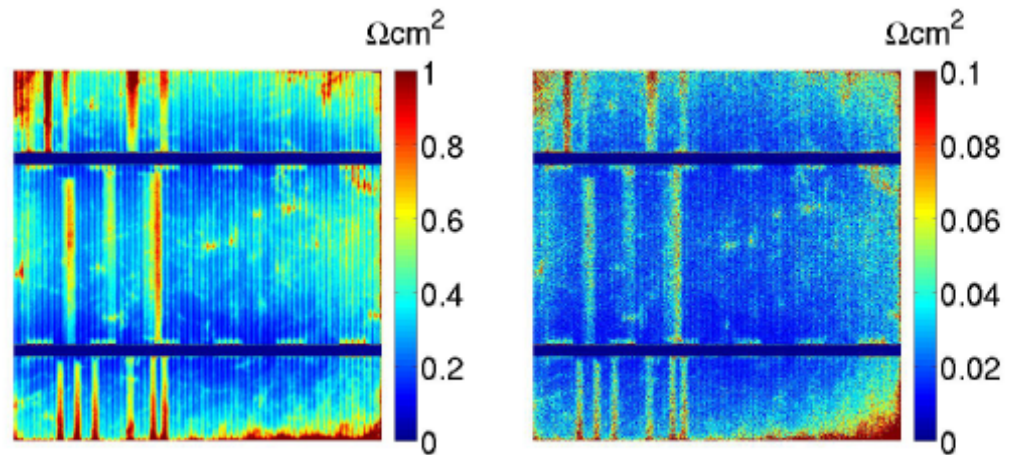


Abb. 34 Serienwiderstandsbild (links) und Messunsicherheit (rechts) an einer Multizelle mit RsEL (Auflösung 434×438)

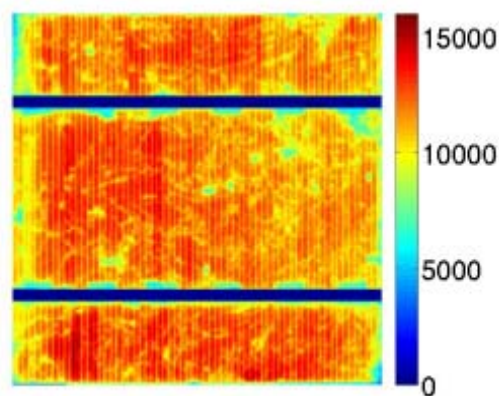


Abb. 35 Dieselbe Zelle mit Photolumineszenz im Leerlaufbetrieb aufgenommen.

Die Messunsicherheiten wurden aus den Messunsicherheiten der einzelnen Messparameter und linearer Fehlerfortpflanzung bestimmt. Wird die Zelle mehrmals hintereinander gemessen und der Fehler aus der Standardabweichung bestimmt, ergibt sich eine gute Übereinstimmung zur Berechnung mittels Fehlerfortpflanzung.

Beim Vergleich des Serienwiderstandsbildes mit dem Photolumineszenzbildes unten sieht man, dass im Bereich niedriger Lebensdauer ein erhöhter Serienwiderstand gemessen wird. Bei der Herleitung wird eine homogene Dunkel-sättigungsstromdichte J_0 angenommen. Für multikristalline Zellen variiert jedoch die Lebensdauer und damit auch J_0 stark. Wäre das tatsächliche erhöhte $J_{0,xy}$ in den Bereichen hoher Rekombination bekannt, würde sich im Vergleich

zur Berechnung mit einem homogenem J_0 ein kleineres $R_{s,xy}$ ergeben. Die Ergebnisse der drei Mittelungsmethoden im Vergleich zum global bestimmten Hellwiderstand $R_{s,mpp}$ bzw. Dunkelwiderstand $R_{s,dark}$ sind hier für mono- und multikristallines Material dargestellt:

Globale Serienwiderstandswerte aus Kennlinien- und RsEL-Messungen in Ωcm^2 .		
	Monozelle	Multizelle
$R_{s,mpp}$	$1,48 \pm 0,01$	$1,02 \pm 0,01$
$R_{s,dark}$	$0,94 \pm 0,01$	$0,601 \pm 0,005$
$R_{s,sim}$	$0,89 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0,04$
$R_{s,mean}$	$0,72 \pm 0,02$	$0,37 \pm 0,03$
$R_{s,inv}$	$0,56 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,03$

Die Werte $R_{s,sim}$ kommen dem global bestimmten Dunkelserienwiderstand sehr nahe. Interessanter für die Performance eine Solarzelle ist jedoch der Hellserienwiderstand, der wesentlich höher liegt.

Ramspeck et al [13]: RESI

Bei der RESI Methode (REcombination current and Series resistance Imaging) wird eine Kombination aus Elektrolumineszenz und Dunkel-Lock-in-Thermographie (DLIT) verwendet. Wie bei RsEL sind die Bilder für die Multizelle und die Mittelungsdaten für die mono- und die multikristalline Zelle gezeigt.

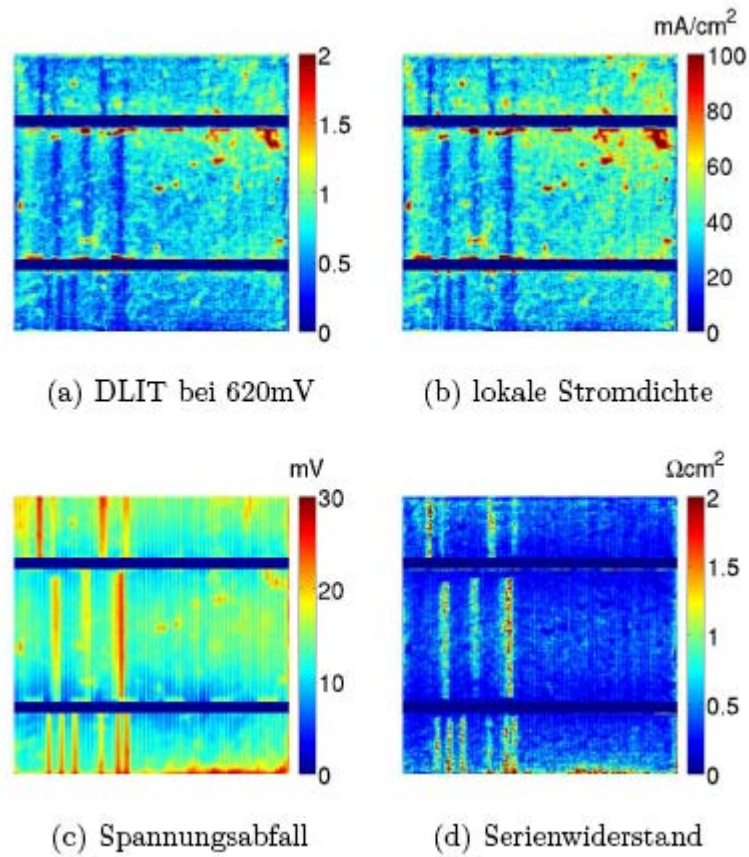


Abb. 36 RESI Methode an einer Multizelle

Globale Serienwiderstandswerte aus Kennlinien- und RESI-Messungen in Ωcm^2 .		
	Monozelle	Multizelle
$R_{s,\text{mpp}}$	$1,48 \pm 0,01$	$1,02 \pm 0,01$
$R_{s,\text{dark}}$	$0,94 \pm 0,01$	$0,601 \pm 0,005$
$R_{s,\text{sim}}$	$1,16 \pm 0,16$	$0,49 \pm 0,08$
$R_{s,\text{mean}}$	$0,94 \pm 0,14$	$0,45 \pm 0,07$
$R_{s,\text{inv}}$	$0,78 \pm 0,14$	$0,33 \pm 0,06$

Wie bei RsEL sieht man, dass die Werte $R_{s,sim}$ nahe den Dunkelreferenzwerten $R_{s,dark}$ liegen. Lebensdauerunterschiede sind noch leicht in dem Serienwiderstandsbild zu erkennen.

Trupke et al [14]: RsPL

Diese Methode basiert auf der Aufnahme von vier Photolumineszenzbildern. Das eigentliche Messbild wird bei 1 Sonne und 80% Stromextraktion bzw. am MPP aufgenommen. Hier sind Serienwiderstandseffekte deutlich im Bild zu erkennen. Zur Kalibration auf absolute Spannungen wird ein Bild bei 0,2 Sonnen verwendet und die Annahme gemacht, dass hier die Spannung am Terminal gleich der homogenen lokalen Diodenspannung ist. Die Gültigkeit dieser Annahme wurde mittels Simulationen überprüft:

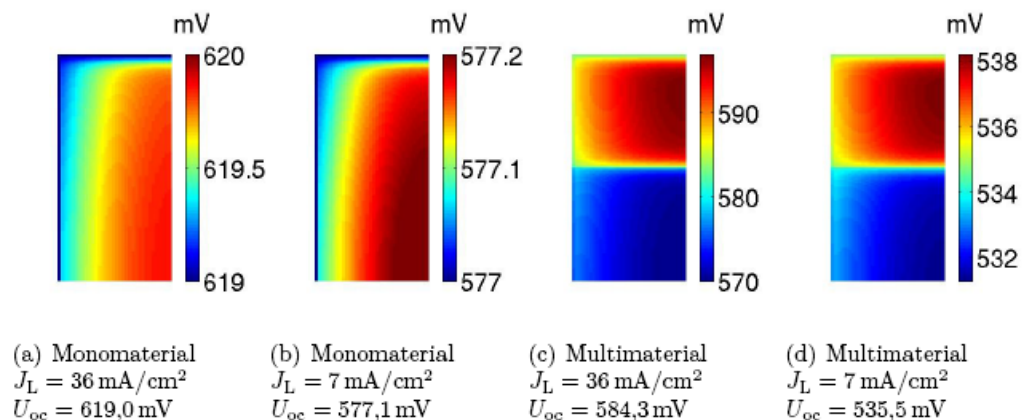


Abb. 37 Hell-Simulationen zum Niederinjektionsbild auf Mono- und Multimaterial. Eine niedrigere Beleuchtungsintensität verringert die Spannungsvariationen auf der Zelle.

Bei 1 Sonne ist die Diodenspannung im Bereich größten Serienwiderstandes um 1mV erhöht, bei reduzierter Beleuchtung wird die Diodenspannung noch homogener. Die Inhomogenität ergibt sich aus den auch im Leerlauf fließenden Strömen in die abgeschatteten Bereiche unter den Fingern und Sammelbussen. Für die Simulationen von Multimaterial wurde der untere Teil der Zelle mit einem Dunkelsättigungsstrom von $J_0 = 10^{-8} \text{ mA/cm}^2$ simuliert, was einer um einen Faktor 100 schlechteren Lebensdauer entspricht und realistische Lebensdauerunterschiede in einer Zelle widerspiegelt. Bei 1 Sonne Beleuchtung sind die Inhomogenitäten für eine akkurate Messung nicht akzeptabel. Bei niedrigerer Beleuchtung werden die Unterschiede jedoch kleiner und führen zu einem relativen Fehler von ca. 1 %.

Von jedem Bild wird dann jeweils ein Kurzschlussbild abgezogen. Es sind die Bilder für die Multizelle und die Mittelungsdaten für die mono- und die multikristalline Zelle gezeigt:

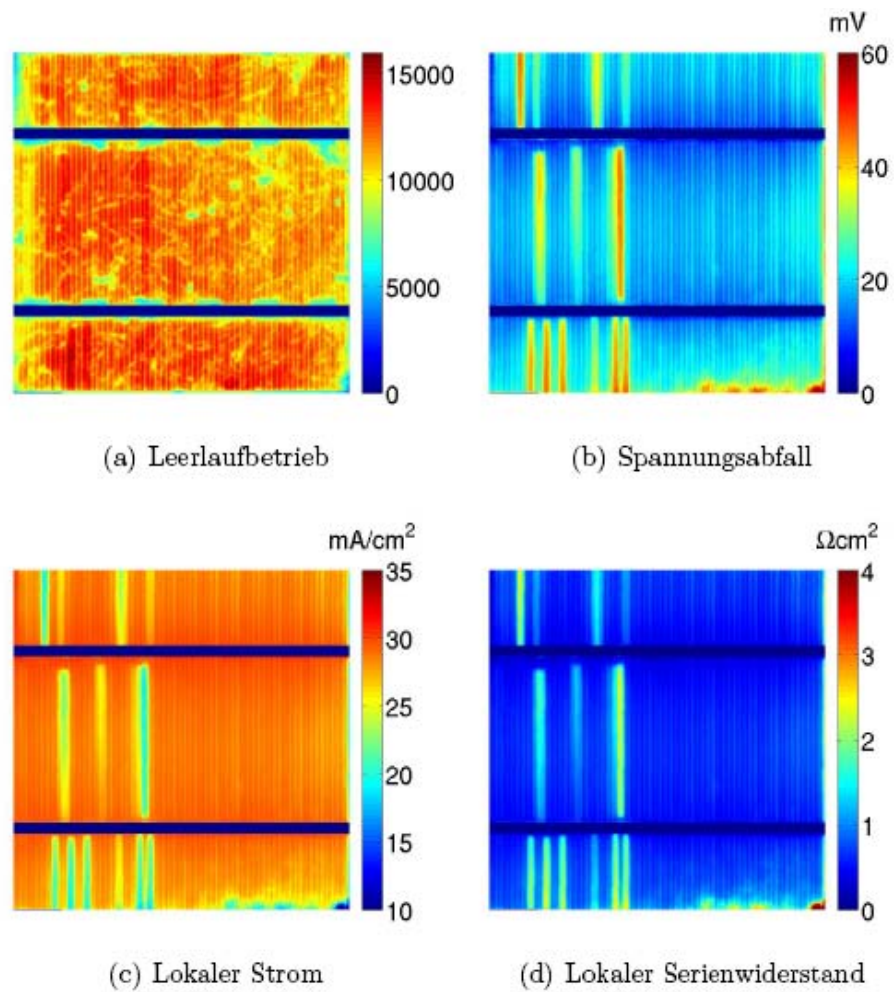


Abb. 38 RsPL an einer Multizelle (Auflösung 654×662)

Globale Serienwiderstandswerte aus Kennlinien- und RsPL-Messungen in Ωcm^2 . Bei den Bildern am MPP ist das Signal-Rausch-Verhältnis schlechter. Da das Photolumineszenzsignal bei kleinem $R_{s,xy}$ schwach ist, kann dies bei der Fehlerberechnung von $R_{s,inv}$ zu sehr hohen Fehlern führen.

	Monozelle	Multizelle
$R_{s,mpp}$	$1,48 \pm 0,01$	$1,02 \pm 0,01$

MPP $R_{s,sim}$	$1,64 \pm 0,10$	$0,93 \pm 0,14$
MPP $R_{s,mean}$	$1,40 \pm 0,10$	$0,87 \pm 0,15$
MPP $R_{s,inv}$	$1,20 \pm 0,15$	$0,62 \pm 5$
80% $J_{sc} R_{s,sim}$	$1,61 \pm 0,06$	$0,82 \pm 0,06$
80% $J_{sc} R_{s,mean}$	$1,36 \pm 0,06$	$0,73 \pm 0,05$
80% $J_{sc} R_{s,inv}$	$1,15 \pm 0,07$	$0,63 \pm 0,07$

Lebensdauerunterschiede sind mit dieser Methode nicht mehr im Serienwiderstandsbild zu sehen. Sowohl $R_{s,sim}$ als auch $R_{s,mean}$ ergeben innerhalb der Fehler gute Übereinstimmung mit dem global bestimmten Hellserienwiderstand.

Inline-Anwendung

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob sich die Methode auch für eine Inline-Messung eignet. Dafür werden Messzeiten von unter 1 s benötigt. Bei den Methoden RsEL und RESI konnte dies nicht erreicht werden. RsPL liefert auch bei Rohdaten mit einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis noch gute Ergebnisse, da die Bilder lediglich pixelweise subtrahiert bzw. dividiert werden. So konnte ein Serienwiderstandsbild in 800 ms aufgenommen werden.

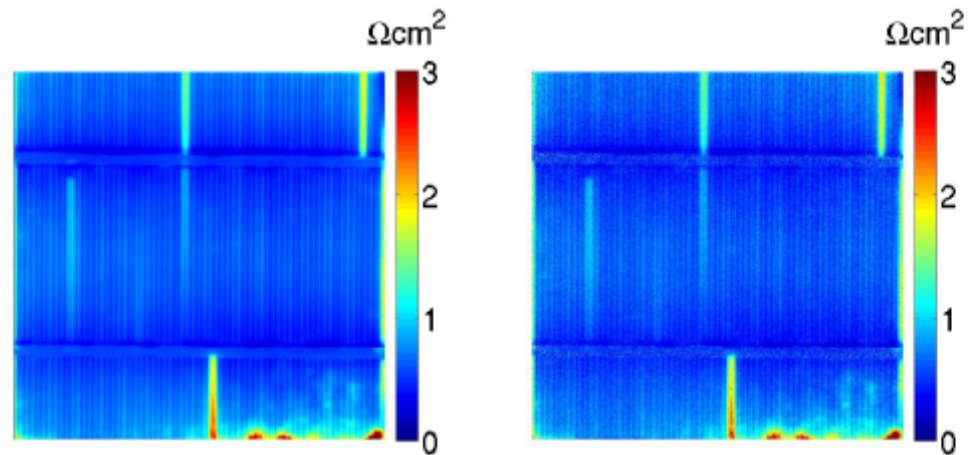


Abb. 38 RsPL Messung in 42 s (links, Auflösung 908×902, $R_{s,sim} = (0,65 \pm 0,03) \Omega\text{cm}^2$) und 800 ms (rechts, Auflösung 454×451, $R_{s,sim} = (0,65 \pm 0,21) \Omega\text{cm}^2$)

Dabei wurde eine Integrationszeit von 100 ms für jedes Bild gewählt. Die Auflösung wurde auf 0,2 Megapixel reduziert, was bei einer Auslesefrequenz von 2MHz zu einer Auslesezeit von 100 ms führt. Jedes der vier benötigten Bilder wird also in insgesamt 200 ms aufgenommen. Ein Referenzbild wurde mit einer gesamten Messzeit von 42 s aufgenommen. Der errechnete globale Wert ist bei beiden Messungen der gleiche, was zeigt, dass auch bei der kurzen Messung quantitativ verlässliche Werte gemessen wurden. Der Fehler der kurzen Messung ist natürlich wesentlich höher. Die gute Übereinstimmung mit der Referenzmessung deutet aber darauf hin, dass dieser zu konservativ berechnet wurde. Die wichtigen Strukturen erhöhten Serienwiderstandes sind auch bei reduzierter Auflösung noch problemlos zu erkennen. Bei dieser geringen Messzeit ist eine Anwendung in einer Produktionslinie möglich. Hierbei würde jede Zelle gemessen und auf Serienwiderstandsprobleme untersucht werden. Falls ein Serienwiderstandsproblem detektiert wird, kann der Wirkungsgradverlust errechnet werden, wie dies in Kapitel 6.4 gezeigt wird. Die Ursachen können schnell aus dem Bild abgelesen und somit der Prozessschritt ermittelt werden, der die Probleme verursacht. Dieses Vorgehen würde es erlauben, dauerhafte oder auch sporadisch auftretende Prozessfehler sofort zu erkennen und zu quantifizieren, um mögliche Maßnahmen zu ergreifen. Damit könnte auch eine schmalere Wirkungsgradverteilung aller prozessierten Zellen erreicht werden. Da in einem Modul die schlechteste Zelle maßgeblich ist, ist die Herstellung möglichst gleichartiger Zellen ein wichtiges Ziel.

Kampwerth et al [15]

Eine im Vergleich zu RsPL etwas aufwändigere Methode wurde von Kampwerth et al vorgestellt. Sie besitzt den Vorteil, dass nicht die Annahme einer lateral homogenen Dunkelsättigungsstromdichte bei der Diodengleichung gemacht werden muss. Es sind wieder die Bilder für die Multizelle und die Mittelungsdaten für die mono- und die multikristalline Zelle gezeigt:

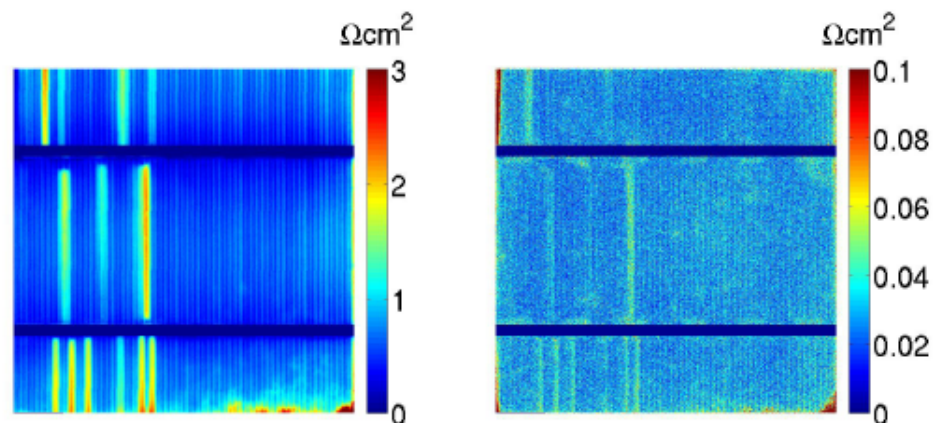


Abb. 39 Lokaler Serienwiderstand (links) und Messunsicherheit (rechts) einer Multizelle mit der Methode von Kampwerth u. a. (Auflösung 654×662). Die Messunsicherheit ist die Standardabweichung von fünf Messungen.

Globale Serienwiderstandswerte aus Kennlinien und Messungen nach Kampwerth et al in Ωcm^2		
	Monozelle	Multizelle
$R_{s,\text{mpp}}$	$1,48 \pm 0,01$	$1,02 \pm 0,01$
$R_{s,\text{sim}}$	$1,64 \pm 0,04$	$0,78 \pm 0,03$
$R_{s,\text{mean}}$	$1,35 \pm 0,04$	$0,70 \pm 0,03$
$R_{s,\text{inv}}$	$1,08 \pm 0,05$	$0,58 \pm 0,04$

Die Ergebnisse stimmen gut mit denen der Methode RsPL überein.

Vergleich der Methoden

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die vier Serienwiderstandsmethoden für mono- und multikristallines Material getestet. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Folgende Tabelle zeigt nochmal alle globalen Werte im Überblick.

Vergleich der vier Lumineszenzmethoden, Serienwiderstandswerte in Ωcm^2		
	Monozelle	Multizelle
$R_{s,\text{mpp}}$	$1,48 \pm 0,01$	$1,02 \pm 0,01$
$R_{s,\text{dark}}$	$0,94 \pm 0,01$	$0,601 \pm 0,005$
RsEL $R_{s,\text{sim}}$	$0,89 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0,04$
RESI $R_{s,\text{sim}}$	$1,16 \pm 0,16$	$0,49 \pm 0,08$
RsPL $R_{s,\text{sim}}$	$1,61 \pm 0,06$	$0,82 \pm 0,06$
Kampwerth $R_{s,\text{sim}}$	$1,64 \pm 0,04$	$0,78 \pm 0,03$

Vergleicht man die beiden Hellmethoden (RsPL, Kampwerth), zeigen die Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung. Selbiges gilt für die Dunkelmethoden (RsEL, RESI). Da die Methode von Kampwerth u. a. mit weniger Annahmen auskommt, rechtfertigt die Übereinstimmung mit RsPL die Annahmen über J_0 und das Niederinjektionsbild. Sehr schön ist zu sehen, dass die Dunkelmethoden kleinere Werte liefern im Vergleich zu den Hellmethoden. Dies liegt daran, dass ohne Beleuchtung kürzere Wege im Emitter zurückgelegt werden. Auch bei den beiden global bestimmten Werten $R_{s,\text{mpp}}$ (hell) und $R_{s,\text{dark}}$ (dunkel) kann dieser Trend beobachtet werden. Da die Hellserienwiderstandswerte für den normalen Betriebsmodus einer Solarzelle interessanter sind, sind die Photolumineszenzmethoden den Elektrolumineszenzmethoden vorzuziehen. Die Übereinstimmung der global bestimmten Werte mit den Lumineszenzwerten ist für monokristalline Zellen besser als für multikristalline. Dieser Sachverhalt wurde schon in Abschnitt 5.3 mittels Netzwerksimulationen untersucht. Unter den beiden Hellmethoden kommt die Methode von

Kampwerth u. a. zwar mit weniger Annahmen aus, die Methode von Trupke u. a. ist jedoch wesentlich schneller. Für den industriellen Einsatz eignet sich daher die Methode RsPL am besten. Für diese Methode wird im nächsten Kapitel eine tiefergehende Analyse durchgeführt.

Korrelation zum Füllfaktor

Im Folgenden soll überprüft werden, ob die kamerabasierte Serienwiderstandsmethode RsPL von Trupke u. a. (2007) die theoretisch vorhergesagte Korrelation zum Füllfaktor wiedergibt. Theoretisch wird die Korrelation

$$\frac{\delta FF}{\delta R_{s, mpp}} = m_{theo} = \frac{J_{mpp}^2}{J_{sc} U_{oc}}$$

erwartet. Um die Korrelation zu überprüfen wird der Serienwiderstand einer Solarzelle manuell erhöht und vor und nach dem Eingriff werden die Serienwiderstandswerte gemessen. Eine einfache Möglichkeit den Serienwiderstand zu erhöhen, ist das Abtrennen einiger Finger vom übrigen Grid mit einem scharfen Messer. Dabei wird durch den Vergleich des Leerlaufbildes vor und nach dem Abtrennen sichergestellt, dass keine großen Shunts oder Rekombinationszentren entstanden sind. Gemessen wird dabei zum Einen fünfmal die globale Kennlinie zur Bestimmung des Füllfaktors und des Wertes $R_{s, mpp}$ durch Vergleich der Hell- und der Dunkelkennlinie. Zum Anderen wird ein Serienwiderstandsbild mit RsPL generiert. Aus dem Serienwiderstandsbild können dann mittels der drei verschiedenen Mittelungsmethoden aus Abschnitt 5.3 die globalen Serienwiderstandswerte $R_{s, sim}$, $R_{s, mean}$ und $R_{s, inv}$ errechnet werden. Die Werte m_i berechnen sich aus $m_i = (FF_{vorher} - FF_{nachher}) / (R_{s, i, nachher} - R_{s, i, vorher})$. Die Messunsicherheiten des Füllfaktors und von $R_{s, mpp}$ wird aus der Standardabweichung bestimmt. Bei den RsPL Bildern wird die Fehlerfortpflanzung angewendet. In nachfolgender Abbildung ist die Zelle vor und nach dem Abtrennen zu sehen.

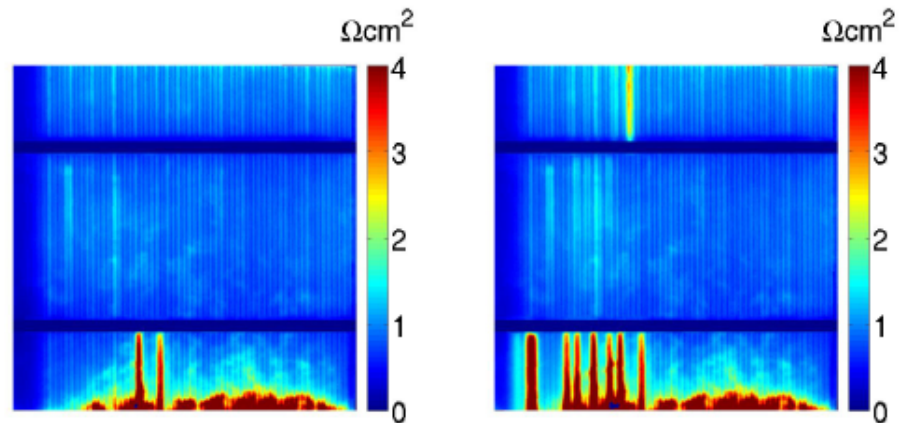


Abb. 40 Serienwiderstandsbild einer multikristalline Zelle mit RsPL vor (links) und nach (rechts) dem Abtrennen einiger Finger

Die Messergebnisse sind in folgender Tabelle gezeigt.

Messergebnisse Füllfaktorkorrelation. Theoretisch wird ein Wert von $m_{\text{theo}} = (4,55 \pm 0,04)\%/\Omega\text{cm}^2$ erwartet.				
	vorher	nachher		FF Korrelation m_i in $\%/\Omega\text{cm}^2$
FF in %	$74,95 \pm 0,06$	$74,09 \pm 0,01$		
$R_{s,\text{mpp}}$ in Ωcm^2	$1,22 \pm 0,02$	$1,38 \pm 0,02$	→	$5,4 \pm 0,9$
$R_{s,\text{sim}}$ in Ωcm^2	$1,06 \pm 0,07$	$1,26 \pm 0,08$	→	$4,3 \pm 2,3$
$R_{s,\text{mean}}$ in Ωcm^2	$1,03 \pm 0,06$	$1,19 \pm 0,06$	→	$5,3 \pm 2,9$
$R_{s,\text{inv}}$ in Ωcm^2	$0,77 \pm 0,07$	$0,87 \pm 0,06$	→	$8,9 \pm 8,4$

Die Ergebnisse zeigen, dass innerhalb des Messfehlers die Werte m_{mpp} , m_{sim} und m_{mean} mit dem theoretischen Wert übereinstimmen. Des weiteren wird das Simulationsergebnis gestützt, dass der simulierte Wert $R_{s,\text{sim}}$ im Vergleich zu $R_{s,\text{mean}}$ stärker auf erhöhte Serienwiderstände reagiert (siehe dazu Abschnitt 5.3). Der Wert $R_{s,\text{inv}}$ zeigt indes sehr hohe Fehler, da der Anstieg im Serienwiderstandswert klein ist, wie dies auch in den Simulationen zu sehen ist. Um die Messfehler der Werte m_i zu erniedrigen, müsste der Füllfaktor weiter redu-

ziert werden. Dies ist aber insofern problematisch, da die Linearität der Kurve $FF(R_s)$ nur bei moderaten R_s -Werten gilt. Alternativ könnten auch sehr lange Messzeiten gewählt werden. Für die Messergebnisse wurde 9 s pro Lumineszenzbild gemessen, da die Anwendbarkeit bei moderaten Messzeiten im Vordergrund stand. Der hier beobachtete Trend bestätigte sich auch in weiteren Messungen. Dieses Ergebnis erlaubt nun eine weitergehende Auswertung der Serienwiderstandsbilder. Auf der Solarzelle beeinflussen sich örtlich getrennte Bereiche nur sehr wenig. Dies sieht man in der Abbildung sehr schön. Erhöht man den Serienwiderstand an einer Stelle, sind entfernte Bereiche davon nicht betroffen. Die große Stärke orts aufgelöster Messungen ist, dass Prozessfehler, die lokal zu einem erhöhten Serienwiderstand führen, örtlich klar von nicht betroffenen Bereichen getrennt werden können. Bildet man einen globalen Wert in einem gut kontaktierten Bereich, kennt man den Serienwiderstandswert einer Solarzelle, die ohne Prozessproblem entstanden wäre. Dieser Bereich muss dabei ein Symmetrieelement darstellen, sodass alle Komponenten des Serienwiderstandes korrekt berücksichtigt werden. Die Differenz des globalen Wertes der gesamten Zelle und des Wertes des guten Bereiches gibt direkt die Erhöhung des globalen Serienwiderstandes aufgrund des Prozessfehlers an. Diese Art der Auswertung ist mit einer einfachen Messung der Kennlinie nicht möglich. Nun kann man die Erkenntnisse aus diesem Kapitel anwenden und aus der Serienwiderstandserhöhung die Erniedrigung des Füllfaktors errechnen. Damit kann auch der Einfluss auf den Wirkungsgrad schnell und einfach bestimmt werden. Diese quantitative Analyse erlaubt es, den Einfluss von Prozessproblemen korrekt einschätzen zu können. Wendet man dieses Verfahren auf die linke Zelle in der Abbildung an, so ergibt sich ein möglicher Füllfaktorgewinn von 1% absolut.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Hellmethoden den Dunkelmethoden allgemein überlegen sind. Die Methode R_sPL erwies sich als zuverlässig, schnell und zeigte eine definierte Korrelation zum Füllfaktor. Eine quantitative Analyse der Serienwiderstandsverluste auf einer Solarzelle ist somit möglich. Zudem zeigt sich, dass die kurzen Messzeiten eine Inline-Anwendung möglich machen.

6 Quantifizierung von Rekombinations- und Widerstandseigenschaften mittels bildgebender Lumineszenzverfahren

Spontane Photoemission und Überschussladungsträgerdichte in Silicium

Die spontane Photoemissionsrate pro Volumen und Energie r_{sp} eines Halbleiters kann durch die lokale Quasi-Ferminiveau-Aufspaltung $\Delta\eta$ beschrieben werden. Mit einem Absorptionskoeffizienten $\alpha(E_\gamma)$ bei der Photonenenergie E_γ und der Lichtgeschwindigkeit in Silicium c' gilt

$$r_{sp}(E_\gamma) = \frac{\alpha(E_\gamma)E_\gamma^2}{\pi^2\hbar^3c'^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{E_\gamma - \Delta\eta}{k_B T}\right) - 1}. \quad (6.1)$$

In dotiertem Silicium mit einer Dotierkonzentration $N_{A/D}$ mit der intrinsischen Ladungsträgerdichte n_i ist $\Delta\eta$ mit der lokalen Überschussladungsträgerdichte Δn verknüpft:

$$\left(\frac{n_i^2}{N_{A/D}} + \Delta n\right)(N_{A/D} + \Delta n) = n_i^2 \exp\left(\frac{\Delta\eta}{k_B T}\right) \quad (6.2)$$

Δn ist die Schlüsselgröße bei Lumineszenzmessungen: Das durch lokale elektronische Eigenschaften bestimmte Tiefenprofil der Überschussladungsträgerdichte $\Delta n(z)$ ergibt sich aus dem ersten Diffusionsgesetz und der Kontinuitätsgleichung (im statischen Fall):

$$\frac{\partial^2 \Delta n(z)}{\partial z^2} - \frac{\Delta n(z)}{L^2} = -\frac{G(z)}{D_e}. \quad (6.3)$$

D_e ist hier die Diffusivität der Minoritätsladungsträger, $G(z)$ ist die lokale tiefenabhängige Anregungsrate pro Volumen und L ist die lokale Minoritätsladungsträger-Diffusionslänge. Im Grenzfall injektionsunabhängiger Rekombinationseigenschaften und einer tiefenunabhängigen Diffusionslänge ist diese Gleichung geschlossen lösbar. Die Randbedingungen einer speziellen Lösung hängen von der Anregungsart ab (EL oder PL).

EL an Solarzellen

Eine Durchlass-Spannung bewirkt Injektion von Minoritäten über den pn-Übergang einer Solarzelle ($z = 0$). Die lokale Diodenspannung U am pn-Übergang bestimmt eine Randbedingung

$$\Delta n|_{z=0} \cong \frac{n_i^2}{N_A} \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right). \quad (6.4)$$

Eine weitere Randbedingung wird durch die lokale Rekombinationsgeschwindigkeit S_b an der Zellrückseite ($z = d$) S_b bestimmt

$$S_b \Delta n|_{z=d} = -D_e \frac{\partial \Delta n}{\partial z} \Big|_{z=d}. \quad (6.5)$$

Die Lösung des (dann homogenen) Problems ist von der Form

$$\Delta n(z) = A \exp\left(\frac{z}{L}\right) + B \exp\left(-\frac{z}{L}\right) \quad (6.6)$$

wobei die Koeffizienten A und B beide von den Parametern n_i, N_A, U, D_e, d sowie den lokalen Rekombinationseigenschaften S_b und L abhängen.

PL an Wafern

Bestrahlung eines Siliciumsubstrats mit monochromatischem Licht bewirkt ein Anregungsprofil $G(z) = \alpha_{\gamma 0} j_{\gamma 0} \exp(-\alpha_{\gamma 0} z)$, wobei $\alpha_{\gamma 0}$ und $j_{\gamma 0}$ den Absorptionskoeffizient und die Stromdichte der ins Substrat eindringenden Photonen sind. Mit Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten S_1 und S_2 sind die Randbedingungen jetzt:

$$\pm S_{1/2} \Delta n|_{z=0/d} = D_e \frac{\partial \Delta n}{\partial z} \Big|_{z=0/d}.$$

womit die Lösung des Problems von der Form

$$\Delta n(z) = A' \exp\left(\frac{z}{L}\right) + B' \exp\left(-\frac{z}{L}\right) - \frac{G(z)}{D_e(\alpha_{\gamma 0}^2 - L^{-2})} \quad (6.8)$$

ist, wobei die Koeffizienten A' und B' von $\alpha_{\gamma 0}, j_{\gamma 0}, D_e, d$ und lokalen Rekombinationseigenschaften S_1, S_2 und L abhängen.

Modellierung der Lumineszenzmessung

Die Photonenrate, die vom Oberflächenelement a_j eines Substrats (entsprechend einem Pixel des ortsauflösenden Detektors, CCD-Kamera) im Raumwinkel Ω' unter Berücksichtigung von Brechung an der Grenzfläche ausgestrahlt wird, ist

$$I_j(E_\gamma) = \frac{\Omega' a_j}{4\pi} (1 - r_f(E_\gamma)) \int_0^d dz \cdot \exp(-\alpha(E_\gamma)z) \cdot r_{sp,j}(E_\gamma, z), \quad (6.9)$$

wobei $r_f(E_\gamma)$ die interne Reflektivität der Vorderseite bezeichnet (in dieser Darstellung sind keine höheren Reflexionsordnungen berücksichtigt, wohl aber in unserem Modell). In Gl. 6.9 kommt Reabsorption von Lumineszenz auf dem Lichtweg aus dem Substrat ins Spiel. Diese wird hier zur Bestimmung der Rekombinationseigenschaften ausgenutzt. Bei Detektion von der der Anregungsseite gegenüberliegenden Substratseite (wie bei einigen im Folgenden gezeigten PL-Messungen) transformiert sich der Reabsorptionsterm zu

$$\exp(-\alpha(E_\gamma)z) \rightarrow \exp(-\alpha(E_\gamma)(d-z)).$$

Mit einem Konversionskoeffizienten Zählereignisse pro Photoelektron κ_{AD} , der spektralen Detektorempfindlichkeit $Q_{cam}(E_\gamma)$ und Filtertransmissionsspektren $T_\lambda(E_\gamma)$, wird das gemessene lokale Lumineszenzsignal auf der einem Pixel j zugeordneten Probenfläche a_j

$$\Phi_{j,\lambda} = \kappa_{AD} \int_0^\infty dE_\gamma \cdot I_j(E_\gamma) \cdot Q_{cam}(E_\gamma) \cdot T_\lambda(E_\gamma) \quad (6.10)$$

Gln. 6.1-6.10 erlauben eine Modellierung des Lumineszenzsignals in Abhängigkeit von lokalen Rekombinationseigenschaften eines Siliciumsubstrats (Solarzelle oder Wafer). Durch Wahl einer geeigneten Kombination von Kurzpass-Filtern und Vergleich mit einer modellierten Lumineszenzintensität wird eine getrennte Bestimmung von Oberflächen- und Volumenrekombination möglich

(s.u.). Die geeignete Wahl von Kurzpass-Filtern impliziert, dass deren Kantenwellenlängen bei Raumtemperatur Eindringtiefen von Licht in Silicium entsprechen, die sowohl deutlich kleiner als auch deutlich größer als die Substratdicke sind (Bsp: Dicke 200 μm ; Kantenwellenlängen 950nm, 1000nm, 1050nm).

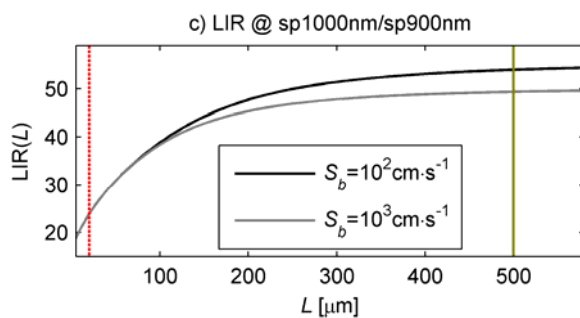
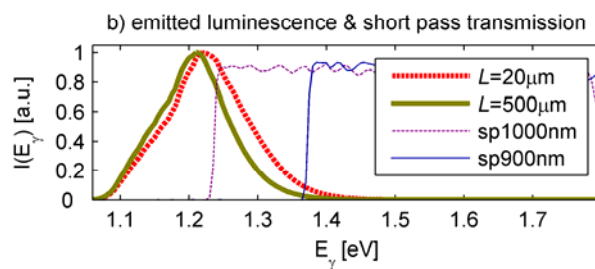
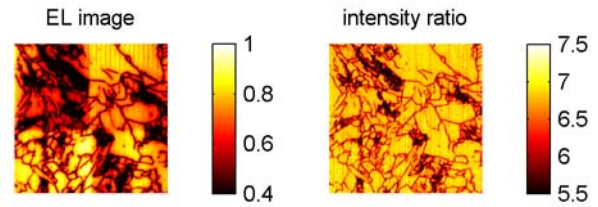
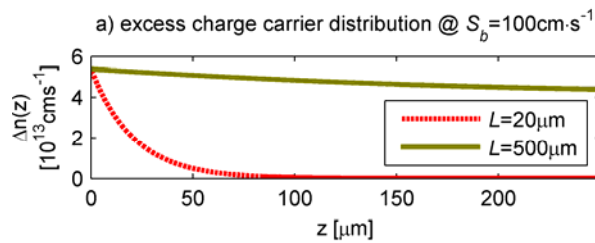
6.1 Messung von Minoritätsladungsträger-Diffusionslängen in Siliciumsolarzellen mittels Elektro- und Photolumineszenz

Die hier gewählte Darstellung ist eng angelehnt an und ausführlicher nachzulesen in der Darstellung in der aus diesem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichung [16].

Aufbauend auf einer in [17] veröffentlichten Idee sollte hier die Einsetzbarkeit der vorgeschlagenen Methode überprüft und deren Erweiterbarkeit auf Photolumineszenz an Wafern untersucht werden.

EL Intensitätsverhältnisse und effektive Diffusionslängenbestimmung

Das Verhältnis der mit verschiedenen Kurzpassfiltern mit geeigneten Kantenwellenlängen innerhalb des Lumineszenzspektrums von Silicium messbaren Lumineszenzintensitäten gibt Aufschluss über die Rekombinationseigenschaften der Solarzellbasis – Elektronendiffusionslänge und Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit. Dabei wird ein lateraler Kontrast der Lumineszenzintensität aufgrund von Serienwiderstandseigenschaften einer Solarzelle eliminiert, was die Interpretation der Intensitätsverhältnisse, im Folgenden als LIR (luminescence intensity ratio) bezeichnet, in Bezug auf Rekombinationseigenschaften erleichtert. Ein Vergleich zwischen einer Modellierung des zu erwartenden Intensitätsverhältnisses als Funktion der Elektronen-Diffusionslänge auf der Basis von Gln. 6.1.-6.10 und Messergebnissen liefert die Elektronen-Diffusionslänge.



▲ Abb 41 Ortsaufgelöste Elektrolumineszenzmessungen (links) an Solarzellen enthalten Information über Widerstands- und Rekombinationseigenschaften. Durch Bildung von Intensitätsverhältnissen (rechts) wird die Widerstandsinformation eliminiert und die Rekombinationsinformation isoliert.

◀ Abb. 42 a) Tiefenprofile der Überschussladungsträgerdichte bei verschiedenen Elektronen-Diffusionslängen. b) Verschiedene Tiefenprofile bewirken eine unterschiedliche Reabsorptions-Signatur des von der Solarzelle ausgestrahlten Lumineszenzspektrums. c) Dieses Spektrum kann durch Messung mit verschiedenen optischen Kurzpassfiltern geeigneter Kantenwellenlängen innerhalb des Lumineszenzspektrums gemessen werden. Durch Messung von Intensitätsverhältnissen der mit verschiedenen Filtern gemessenen Intensitäten ist somit eine ortsaufgelöste Diffusionslängenbestimmung möglich.

Bei der Umsetzung der hier beschriebenen Methode am Fraunhofer ISE tauchten einige methodeninhärente Probleme grundlegender Natur auf, die im Folgenden dargelegt werden sollen. Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelten Lösungsansätze sind ebenfalls erläutert (Detail: siehe erwähnte Veröffentlichungen).

Laterale Inhomogenität der optischen Filter

Die heute erwerblichen dielektrischen Kurzpass-Filter weisen leider typischerweise nicht die für diese Methode erforderliche hohe laterale Konstanz ihrer Transmissionseigenschaften – speziell ihrer Kantenwellenlänge – auf. Typische Variationen der Kantenwellenlänge über die gesamte Filterfläche mögen über 10nm hinausgehen. Damit wird eine Diffusionslängenbestimmung gemäß der von Würfel et al. vorgeschlagenen Methode unmöglich, sofern man diese laterale Inhomogenität der Filter nicht in der Berechnung berücksichtigt.

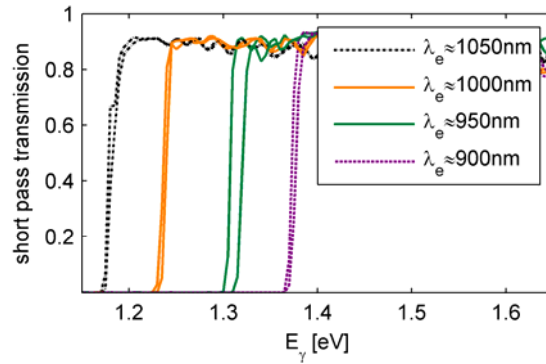


Abb. 43 Typische extreme gemessene Schwankung der Transmissionseigenschaften verwendeter Kurzpass-Filter. Eine Korrektur / Berücksichtigung dieser Inhomogenität im Messergebnis ist möglich.

Im Rahmen dieses Projekts konnte gezeigt werden, dass eine derartige Berücksichtigung der Filterinhomogenität durch einen einmaligen zusätzlichen Messaufwand und einen leicht abgeänderten Auswertalgorithmus möglich ist. Dazu wurde die Filterfläche in $N=13$ virtuelle, konzentrische Untereinheiten unterteilt, innerhalb derer hinreichend homogene Transmissionseigenschaften angenommen werden können. Innerhalb jeder dieser Untereinheiten i wurden die Transmissionseigenschaften dann genau gemessen, um jeweils eine Kalibrierfunktion $LIR_i(L)$ des zu erwartenden Lumineszenz-Intensitätsverhältnisses als Funktion der Elektronen-Diffusionslänge L zu bestimmen. In einem weiteren Schritt wurde experimentell der Anteil W_{ij} des durch die Filterfläche i auf Kamerapixel j treffenden Lichts bestimmt (mittels geeigneter Blenden). Damit konnte dann eine für jedes Kamerapixel j eine um laterale Inhomogenität der Transmissionseigenschaften der optischen Filter bereinigte Kalibrierfunktion berechnet werden:

$$LIR_j = \sum_{i=1}^N LIR_i(L) \cdot W_{ij} \tag{6.11}$$

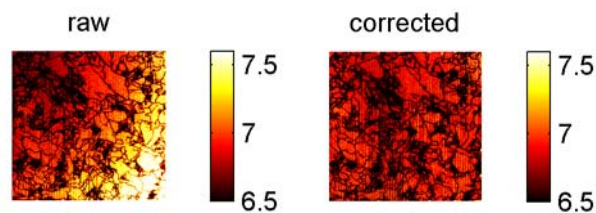
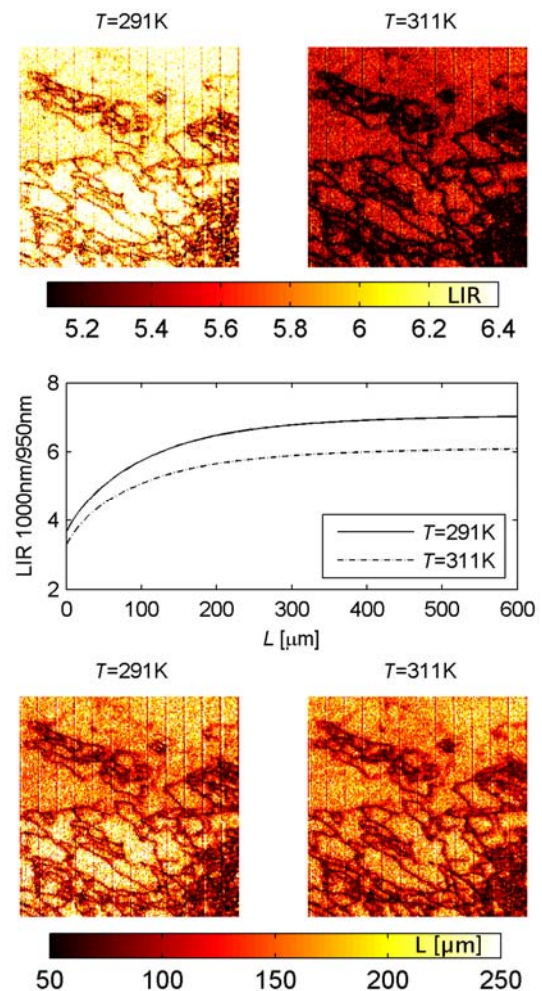


Abb. 44 Korrektur der mit zwei Kurzpass-Filtern der Kantenwellenlängen 1000nm und 950nm gemessenen Intensitätsverhältnisse um laterale Inhomogenität der Transmissionseigenschaften der verwendeten Filter.

Temperaturabhängigkeit

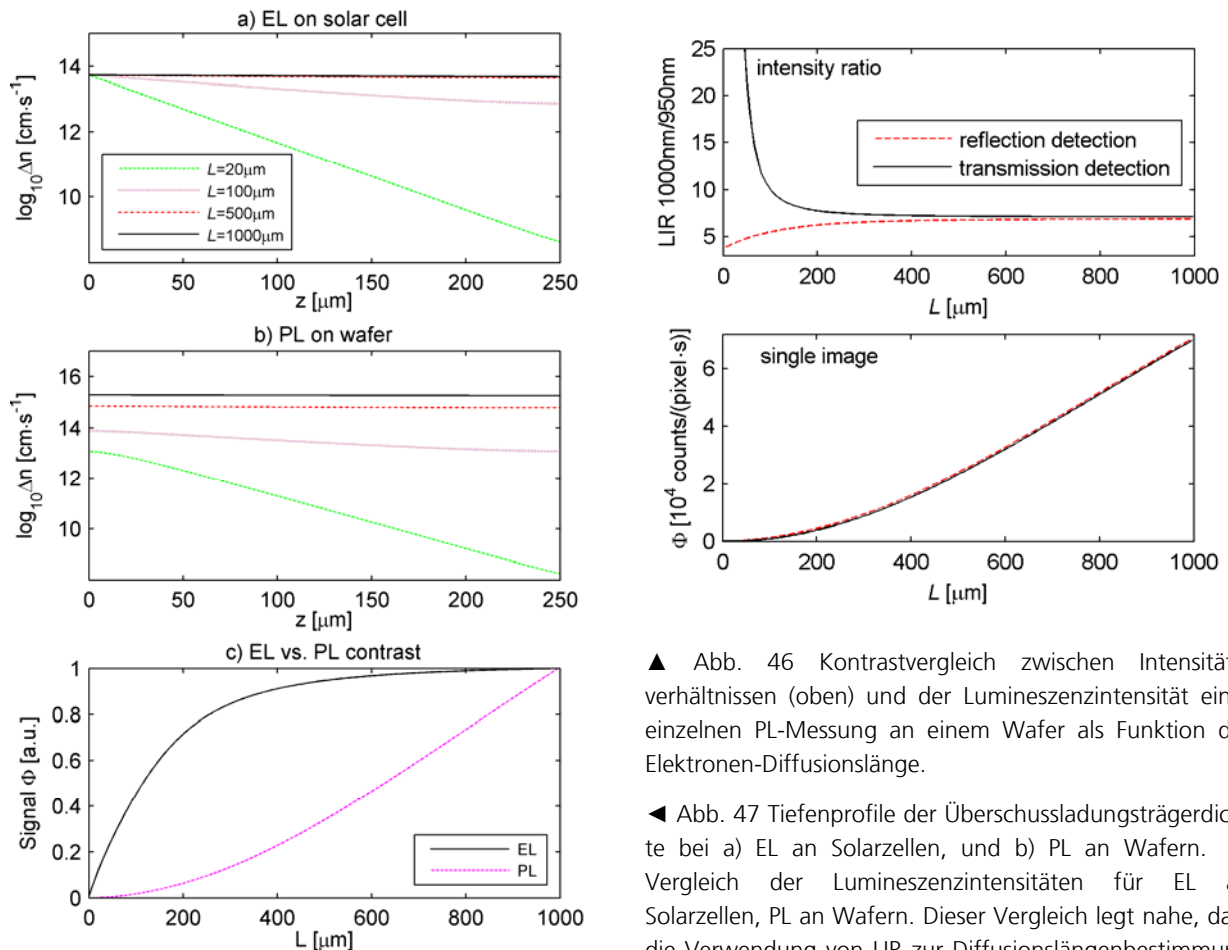
Lumineszenz-Intensitätsverhältnisse sind aus verschiedenen Gründen temperaturabhängig. Eine Verschiebung der mittleren Energie des Lumineszenzspektrums hin zu höheren Energien mit steigender Temperatur ist eine unmittelbare Folge der Bose-Statistik. Die Zunahme der intrinsischen Ladungsträgerdichte mit der Temperatur, sowie die Zunahme des temperaturabhängigen Absorptionskoeffizienten in Silicium tun ihr Übriges, sodass unterm Strich die Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten unabdingbar ist.

◀ Abb. 45 Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Lumineszenzspektrums ist notwendig, um eine temperaturunabhängige Interpretation von LIR (luminescence intensity ratios) in Bezug auf die Elektronen-Diffusionslänge zu gewährleisten.



Erweiterung auf Photolumineszenz

Der grundlegende Unterschied zwischen Elektrolumineszenz an Solarzellen und Photolumineszenz an Wafern liegt in den in Gln. 6.4-6.5 bzw. Gl. 6.7. Demnach wird die Überschussladungsträgerdichte (und damit das Lumineszenzsignal) bei EL an Solarzellen durch eine anliegende Spannung auf ein festes, maximales Niveau festgelegt. Bei PL an Wafern ist dies nicht der Fall, weshalb der Signalkontrast in Einzelbildern bei Diffusionslängen in der Größenordnung der Waferdicke und darüber typischerweise sehr viel größer ist als der Signalkontrast der LIR in der Elektronendiffusionslänge.



▲ Abb. 46 Kontrastvergleich zwischen Intensitätsverhältnissen (oben) und der Lumineszenzintensität einer einzelnen PL-Messung an einem Wafer als Funktion der Elektronen-Diffusionslänge.

◀ Abb. 47 Tiefenprofile der Überschussladungsträgerdichte bei a) EL an Solarzellen, und b) PL an Wafern. c) Vergleich der Lumineszenzintensitäten für EL an Solarzellen, PL an Wafern. Dieser Vergleich legt nahe, dass die Verwendung von LIR zur Diffusionslängenbestimmung für EL an Zellen geeigneter ist als für PL an Wafern.

Lebensdauern / Diffusionslängen aus einzelnen PL-Messungen

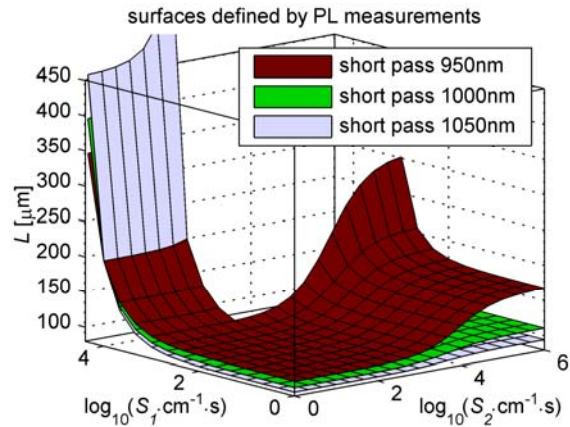
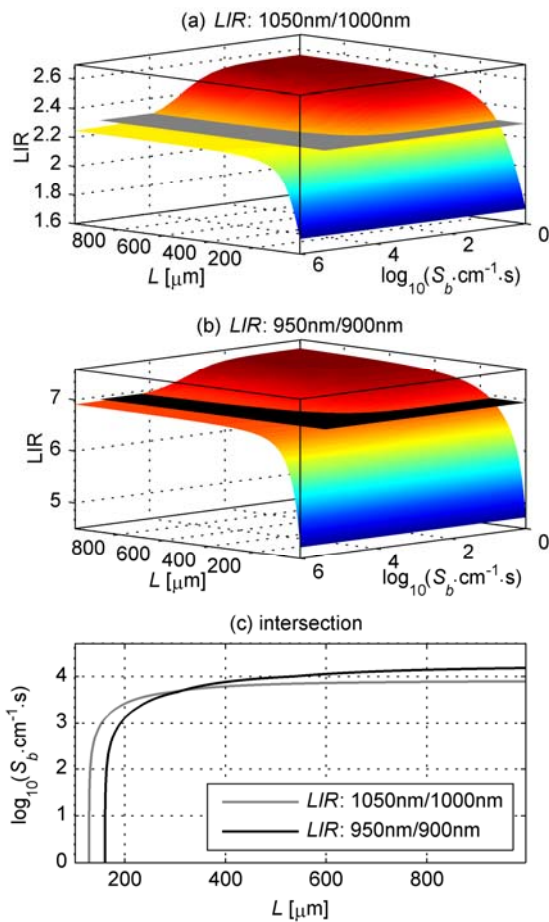
Dies wurde zum Anlass genommen, um eine Kalibrierung einzelner orts aufgelöster PL-Messungen an Wafern auf Elektronen-Diffusionslängen bzw. Lebensdauern zu versuchen. An Wafern mit glatter Oberfläche gelang dieser Versuch unerwartet gut, wie Referenzmessungen belegen. An Wafern mit rauer Oberfläche (etwa durch Ätze oder Textur) konnten allerdings bisher keine verlässlichen Rekombinationseigenschaften gemessen werden.

6.2 Trennung lokaler Volumen- und Oberflächenrekombination in kristallinem Silicium mittels Reabsorption von Lumineszenz

Auf der Basis der vorhergehenden Analyse der Möglichkeiten, Information über die Rekombination aus Lumineszenzbildern mit unterschiedlicher Filterung zu gewinnen wurde ein neues Verfahren zur Trennung der Volumen- und der Oberflächenrekombination erarbeitet. Dieses Verfahren ist im jetzigen Entwicklungszustand nicht in-linefähig, aber kann sehr nützlich bei der off-line Analyse von Zwischenstufen aus der Produktion sein, um den Ursprung aufgetretener Probleme eindeutig einer Ursache zuordnen zu können.

Die hier gewählte Darstellung ist eng angelehnt an die Darstellung in der aus diesem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichung [18], geht jedoch nicht auf alle Detailfragen ein.

Aufbauend auf einer Methode zur orts aufgelösten Bestimmung von Minoritätsladungsträger-Diffusionslängen durch Reabsorption mittels Elektrolumineszenz [17] und auf einer Methode zur Bestimmung orts aufgelöster Lebensdauern in Wafern mittels Photolumineszenz [16] wurde hier eine Methode zur Trennung von Oberflächen- und Volumenrekombination in Siliciumsolarzellen (EL) und Siliciumwafern (PL) entwickelt und experimentell überprüft.



▲ Abb. 48 Eine lokal auf einem Siliciumwafer gemessene PL-Intensität reduziert die Menge möglicher Rekombinationseigenschaften auf eine Schar $L(S, S)$. Drei dieser zu Messungen mit verschiedenen Kurzpass-Filtern gehörigen Untermengen sind hier gezeigt. Deren Schnittpunkt gibt die lokalen Rekombinationseigenschaften an.

◀ Abb. 49 Das lokale Lumineszenz Intensitätsverhältnis (LIR) mit verschiedenen Kurzpass-Filtern aufgenommener EL-Bilder einer Solarzelle reduziert die Menge möglicher Rekombinationseigenschaften auf eine Schar $L(S)$. (a) und (b) zeigen durch zwei Messungen mit verschiedenen Filterkombinationen ausgezeichnete Scharen $L(S)$, (c) zeigt deren Schnittpunkt im Parameterraum der Rekombinationseigenschaften.

Grundidee der Trennung von Rekombinationseigenschaften

Die N Rekombinationseigenschaften, auf die eine Lumineszenzmessung sensitiv ist bilden einen N -dimensionalen Parameterraum. Eine Lumineszenzmessung reduziert die Freiheitsgrade der mit der Messung kompatiblen Rekombinationseigenschaften auf einen $(N-1)$ -dimensionalen Unterraum. Werden N Messungen zu geeignet unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt, so liefert die Schnittmenge der Unterräume die gesuchten Rekombinationseigenschaften (vorausgesetzt die Unterräume sind linear unabhängig und das Rauschen der Messungen ist hinreichend niedrig).

Im Folgenden sollen zwei vereinfachende Annahmen gemacht werden:

- Hinreichend geringe Injektionsabhängigkeit der Rekombination

- Tiefenunabhängige Rekombinationseigenschaften

EL an Solarzellen

EL-Bilder von Solarzellen sind beeinflusst von einem wesentlich durch Serienwiderstand dominierten Kontrast der lokalen Diodenspannung und einen Rekombinationskontrast. Um den Spannungskontrast abzuseparieren bildet man nach [2] Intensitätsverhältnisse von Bildern, die mit verschiedenen Kurzpass-Filtern aufgenommen wurden. Diese sind nur von Rekombinationskontrast dominiert, also sensitiv auf sowohl S_b und L (nicht auf Emitterrekombination, da dessen Dicke und damit dessen Strahlung vernachlässigbar ist). In diesem zweidimensionalen Parameterraum bedeutet eine Messung eines lokalen Intensitätsverhältnisses eine Reduktion der möglichen Rekombinationseigenschaften auf eine Schar $L(S_b)$. Der Schnittpunkt der Scharen zweier Messungen mit verschiedenen Filterkombinationen liefert bei hinreichender linearer Unabhängigkeit die Werte S_b und L .

PL an Wafern

PL-Bilder sind dominiert von der Volumenrekombination L und Oberflächenrekombination S_1, S_2 . Eine lokale PL-Messung bedeutet eine Reduktion der möglichen Rekombinationseigenschaften auf eine Schar $L(S_1, S_2)$, und der Schnittpunkt der Scharen dreier Messungen mit verschiedenen Filtern liefert bei hinreichender linearer Unabhängigkeit die Werte L, S_1 und S_2 .

Trennungsalgorithmus

Ein denkbarer Algorithmus zur Trennung von Oberflächen- und Volumenrekombination besteht aus einer numerischen Berechnung des Schnittpunkts der durch Lumineszenzmessungen mit Kurzpass-Filtern der Kantenwellenlänge λ_i ausgezeichneten Unterräume $L_{\lambda_i}(S_1, S_2)$. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass dieser Algorithmus für Lumineszenzmessungen ungeeignet ist. Dies hängt mit einer unzureichenden linearen Unabhängigkeit der verschiedenen Scharen zusammen. Einer groben Abschätzung zufolge ist für eine Diffusionslängenbestimmung mit einer Unsicherheit von $\pm 20\%$ ein relatives Rauschniveau von weniger als 10^{-4} vonnöten, wohingegen das typische relative Rauschniveau einer Lumineszenzmessung über 10^{-2} liegt (statistisches Rauschen der spontanen Emission).

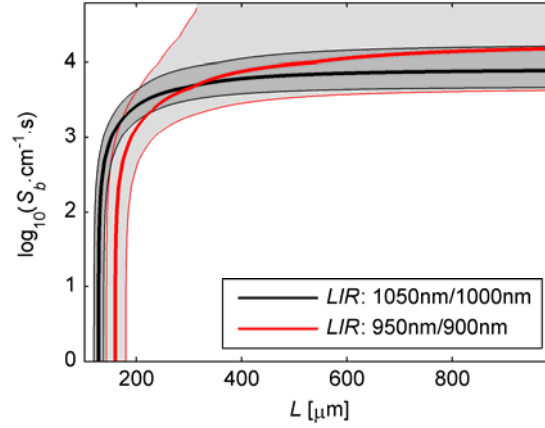


Abb. 50 Die durch Rauschen bedingte Unsicherheit gemessener Intensitätsverhältnisse (vgl. Abb. 1) impliziert eine Unsicherheit der zu bestimmenden Rekombinationseigenschaften. Hier ist die Fortpflanzung einer Unsicherheit der LIR von $\pm 1\%$ auf die Unsicherheit der Rekombinationseigenschaften veranschaulicht.

Ein Algorithmus, der sich als geeigneter erwiesen hat, berechnet an jedem Ort j das Minimum einer Funktion $\chi_{j,PL}(L, S_1, S_2)$, die die Summe der Abweichungsquadrate zwischen modellierten Kamerasignalen $\Phi_{\lambda_i}(L, S_1, S_2)$ und gemessenen Kamerasignalen Φ_{j,λ_i} darstellt. Summiert wird dabei über verschiedene Kurzpass-Filter (Kantenwellenlänge λ_i):

$$\chi_{j,PL}(L, S_1, S_2) = \sum_i \left(\Phi_{\lambda_i}(L, S_1, S_2) - \Phi_{j,\lambda_i} \right)^2. \quad (6.12)$$

Bei EL an Solarzellen ist

$$\chi_{j,EL}(L, S_b) = \sum_{i,k} \left(LIR_{\lambda_i,\lambda_k}(L, S_b) - LIR_{j,\lambda_i,\lambda_k} \right)^2 \quad (6.13)$$

eine Funktion der modellierten Intensitätsverhältnisse $LIR_{\lambda_i,\lambda_k}(L, S_b)$ sowie der gemessenen Intensitätsverhältnisse $LIR_{j,\lambda_i,\lambda_k}$.

Die Überlegenheit dieses Trennungsalgorithmus kann folgendermaßen erklärt werden: Je größer die Steigung der Lumineszenzintensität (oder des Intensitätsverhältnisses) in eine bestimmten Rekombinationsparameter ist, desto kleiner ist die rauschbedingte Unsicherheit dieses mit einem bestimmten Messergebnis verträglichen Rekombinationsparameters (vgl. Abb. 5 & 7) – desto schwächer ist also die Fortpflanzung eines Messfehlers. Ersterer Trennungsalgorithmus kompensiert diese Folge einer im Parameterraum variablen Fehlerfortpflanzung nicht – er läuft tendenziell in Bereiche mit einer schwa-

chen Fehlerfortpflanzung. Dies wird experimentell sehr gut bestätigt. Dagegen kompensiert der überlegene zweite Algorithmus die Folge einer im Parameter-
raum variablen Fehlerfortpflanzung dadurch, dass rauschbedingte Abwei-
chungen von einer idealen Messung in Bereichen mit schwacher Fehlerfort-
pflanzung sehr viel stärker und in Bereichen mit starker Fehlerfortpflanzung
sehr viel schwächer zum Abweichungsquadrat zwischen Modell und Messung
beitragen.

Ergebnisse: EL an Solarzellen

Abb. 51 zeigt eine ortsaufgelöste Messung der Rückseitenrekombinations-
geschwindigkeit einer hocheffizienten FZ-basierten Solarzelle mit einem voll-
flächigen Bor-BSF. In der folgenden Tabelle werden die Rückseitenrekombina-
tionsgeschwindigkeiten verschiedener Technologien im Vergleich zwischen
der hier vorgestellten Methode und dem Ergebnis einer PC1D-Anpassung an
eine EQE-Messung betrachtet. Für alle untersuchten Rückseitentechnologien
bis auf das Al-BSF beobachten wir eine sehr gute Übereinstimmung zwischen
EL- und EQE-Messungen. Die Abweichung beim Al-BSF könnte auf die kom-
plexe optische Struktur dieser Rückseite, zurückzuführen sein. Weitere Unter-
suchungen hierzu stehen noch aus. Abb. 9 zeigt Elektronendifusionslänge
und Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit einer multikristallinen Zelle
mit einer oxidpassivierten LFC-Rückseite.

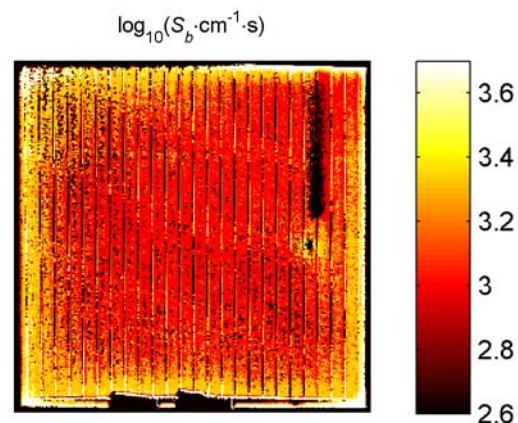
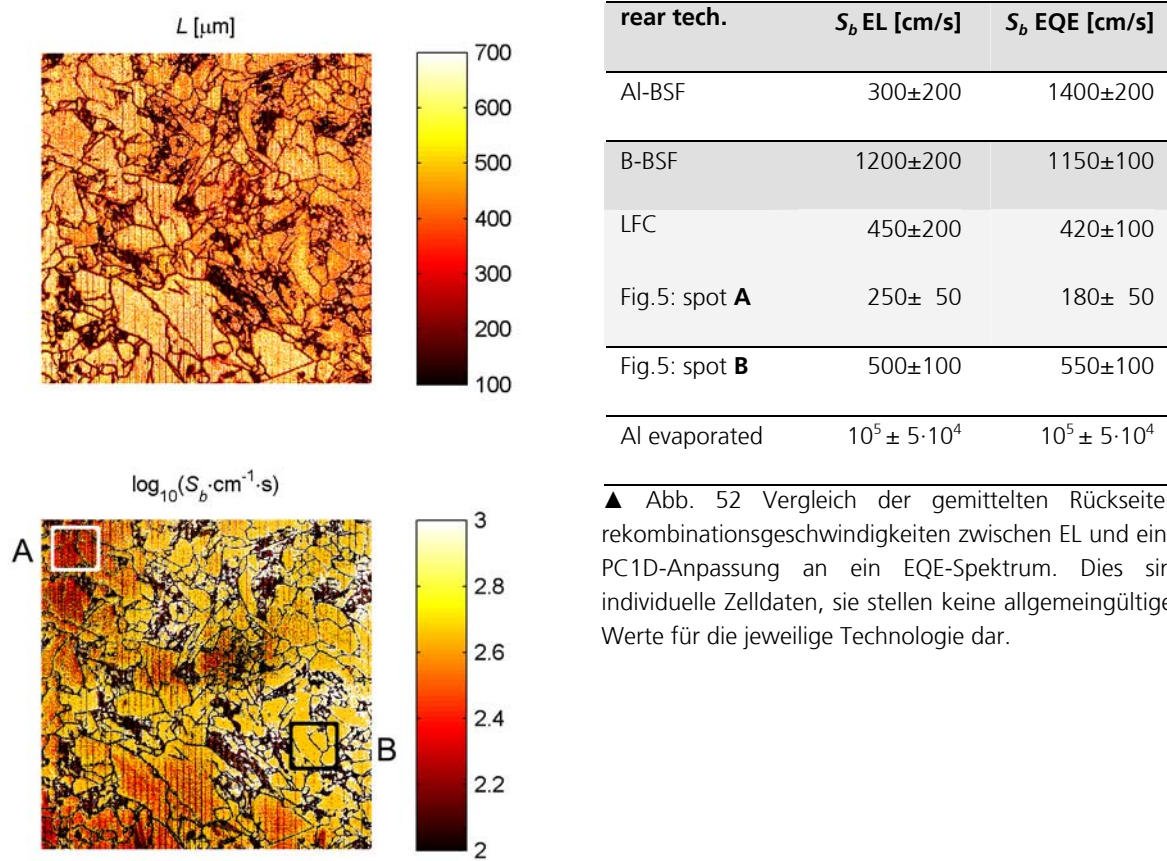


Abb. 51 Ortsaufgelöste Bestimmung der Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit einer monokristallinen (FZ) Siliciumsolarzelle mit vollflächigem Bor-BSF (Fläche: 2x2 cm², Auflösung: 60x60 μm²). Die dunklen Bereiche im unteren Bildbereich sind auf die Kontaktierung während der Messung zurückzuführen, der dunkle Streifen rechts oben ist verursacht durch laterale Diffusion infolge eines Gradienten der Überschussladungsträgerdichte aufgrund eines abgerissenen Fingers. Der dunkle Spot in der Mitte rechts weist auf einen kleinen Shunt hin (Messartefakt). Trotz dieser beiden lokalen Defekte ist die Übereinstimmung der Rückseitenrekombination mit einer EQE-Analyse sehr gut.



▲ Abb. 52 Vergleich der gemittelten Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeiten zwischen EL und einer PC1D-Anpassung an ein EQE-Spektrum. Dies sind individuelle Zelldaten, sie stellen keine allgemeingültigen Werte für die jeweilige Technologie dar.

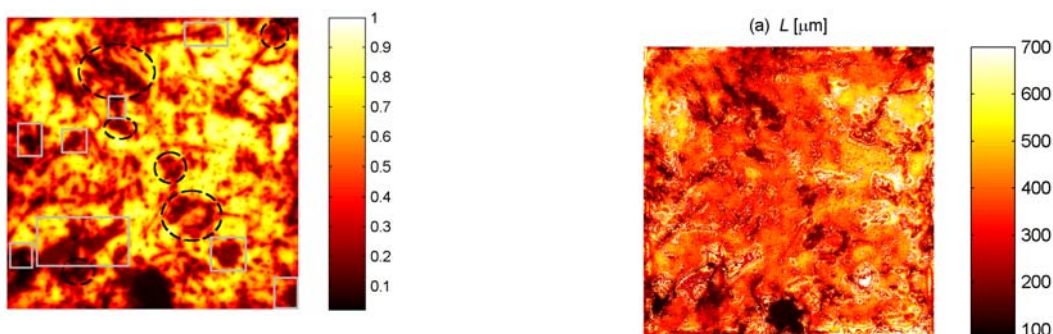
▲ Trennung von Elektronendiffusionslänge (oben) und Rückseitenrekombination (unten) auf einer multikristallinen Siliciumsolarzelle mit einer oxidpassivierten LFC-Rückseite (Fläche: 9x9 cm², Auflösung: 100x100 μm²). Körner verschiedener Qualität sind unterscheidbar, Bereiche verschiedener Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit sind identifizierbar. Die Übereinstimmung der in den Bereichen A und B bestimmten Werte mit einer EQE-Analyse ist sehr gut (vgl. Tab.2). Es gibt einen Rückkopplungseffekt von Korngrenzen auf die Bestimmung der lokalen Rückseitenrekombination.

Wie aus der hier gezeigten Tabelle hervorgeht, ist auch hier die Übereinstimmung der ermittelten Oberflächenrekombination mit einer EQE-Analyse in ausgezeichneten Bereichen (A und B) sehr gut. Körner verschiedener Volumenmaterialqualität sind unterscheidbar. Allerdings kann man auch eine (unphysikalische) Rückkopplung des Diffusionslängenbildes auf die Rückseitenrekombination (an Korngrenzen) beobachten. Dies ist sehr wahrscheinlich ein auf laterale Diffusion von Ladungsträgern und optische Verschmierung der Ortsinformation durch nicht perfekt ebene Oberflächen zurückzuführendes Artefakt, das in unserem eindimensionalen Modell nicht berücksichtigt wird.

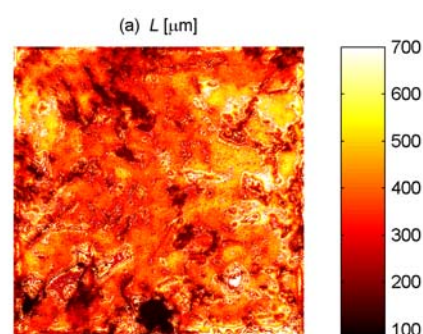
Ergebnisse: PL an Wafern

Hier seien vier Kategorien lateral variabler Eigenschaften von Substrat und Messaufbau erwähnt, die das Messergebnis beeinflussen können:

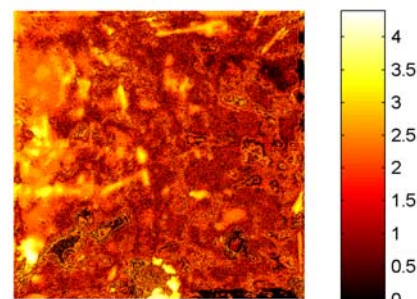
- Laterale Variation der Kantenwellenlänge der verwendeten Kurzpass-Filter – korrigiert nach einer in [16] vorgestellten Methode.
- Laterale Variation der Anregungsdichte ($\pm 8\%$) – korrigiert durch Normierung der gemessenen Intensität auf eine homogene Anregungsdichte
- Dickenvariationen des Substrats – korrigiert durch Messung und Normierung gemessener Intensität auf eine homogene Substratdicke.
- Laterale Inhomogenität der spektralen internen Reflektivität des Substrats – hier als hinreichend klein angenommen.



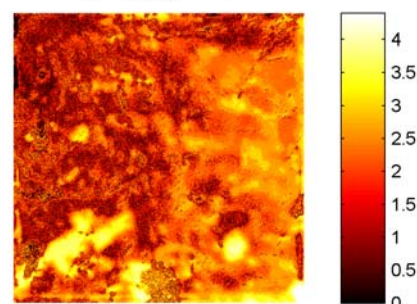
▲ Abb. 53 PL-Intensität eines SiN-passivierten Siliciumwafers (a.u., Fläche: $7 \times 7 \text{ cm}^2$, Auflösung: $100 \times 100 \text{ }\mu\text{m}^2$, Anregungsintensität äquivalent 0.2 Sonnen @ $\lambda = 790 \text{ nm}$, im Durchlicht-Setup gemessen). Einige ausgewiesene Oberflächen- (rechteckig) und Volumendefekte (elliptisch) sind markiert.



(a) $L \text{ [}\mu\text{m]}$



(b) $\log_{10}(S_1 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s})$



(c) $\log_{10}(S_2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s})$

► Abb. 54 Trennung von Rekombinationseigenschaften des in obiger Abbildung gezeigten Wafers, gemäß einer Messung mit 3 Kurzpass-Filtern (950nm, 1000nm, 1050nm) in 2 Probenorientierungen. Die Trennung erfolgte nach dem auf Gl. 6.13 basierenden Algorithmus.

Obwohl Rekombinationseigenschaften von Siliciumwafern aus PL-Bildern aufgrund der Struktur der Randbedingungen deutlich schlechter getrennt be-

stimmbar sind, als dies bei EL an Solarzellen der Fall ist (vgl. [17]), war es möglich, sowohl Diffusionslängen als auch Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten orts aufgelöst zu bestimmen und Defekten ihre Lokalisierung zuzuweisen (auf einer der beiden Oberflächen oder im Volumen), wie Abb. 10 & 11 verdeutlichen. Der hier verwendete Trennungsalgorithmus bedurfte allerdings noch einer weiteren Verfeinerung: Hier werden zwei Probenorientierungen (in Bezug auf Detektion und Anregung) berücksichtigt. Mit $\xi = f, r$ wird die Probenorientierung indiziert:

$$\chi_{j,PL}(L, S_1, S_2) = \sum_{\xi=f,r} \sum_i \left(\Phi_{\lambda_i}^{\xi}(L, S_1, S_2) - \Phi_{j,\lambda_i}^{\xi} \right)^2. \quad (6.14)$$

Diese Verfeinerung wurde notwendig, weil insbesondere bei relativ großen Diffusionslängen (verglichen mit der Substratdicke) Oberflächenrekombination eher die absolute integrale Überschussladungsträgerdichte als deren Tiefenverteilung beeinflusst, auf die die hier vorgestellte Analyse jedoch sensitiv ist.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass lokalen Defekten der richtige Ort zugewiesen wird. Die globale Oberflächenqualität wird erwartungsgemäß wiedergegeben, wie sich aus Referenzmessungen effektiver Lebensdauern an identisch passiviertem FZ-Material schließen lässt. Hinzu kommt, dass großflächige Bereiche niedriger Passivierqualität identifizierbar sind. Es gibt allerdings auch Rückkopplungseffekte zwischen den ermittelten Oberflächen- und Volumenrekombinationseigenschaften.

Grenzen der Methode

- Anwendbarkeit ist beschränkt auf Proben, in denen Rekombinationseigenschaften das Tiefenprofil der Überschussladungsträgerdichte beeinflussen (nicht nur deren absolute Höhe). Dies ist z.B. nicht erfüllt für Al_2O_3 -passiviertes FZ-Material, in dem effektive Diffusionslängen die Materialdicke um 1-2 Größenordnungen übersteigen können und das Tiefenprofil sehr homogen ist.
- Anwendbarkeit ist (noch) beschränkt auf Proben mit hinreichend glatter Probenoberfläche.
- Lokale Variation der internen Reflektivität eines Substrats werden nicht erfasst. Da diese nur lokal gemessen, aber global verwendet wird, mögen lokale Abweichungen vom gemessenen Wert einen systematischen Fehler bei der Bestimmung der lokalen Rekombinationseigenschaften implizieren.
- Injektionsabhängigkeit von Rekombinationseigenschaften ist nicht berücksichtigt. Dies ist allerdings weitgehend unkritisch, sofern die Überschussladungsträgerdichte über die Substrattiefe nicht signifikant variiert.

- Analyse basierend auf einem eindimensionalen Modell: Bei sehr hohen effektiven Diffusionslängen oder sehr hohen lateralen Gradienten in der Materialqualität (Korngrenzen) kann laterale Diffusion von Ladungsträgern das Ergebnis erheblich beeinträchtigen.

6.3 Verteilung lokaler Diodenspannungen aus bildgebender Elektrolumineszenz – Untersuchung zur direkten Kalibrierung einzelner Messungen & Serienwiderstands-Imaging

Die in Elektrolumineszenzmessungen an Solarzellen einfließenden Parameter beschränken sich nicht auf Rekombinationseigenschaften. Die in Gl. 6.4. angegebene Randbedingung führt zu einer starken Abhängigkeit der Überschussladungsträgerdichte (und damit des Lumineszenzsignals) von der lokal anliegenden Diodenspannung. Diese ist wiederum eng mit dem orts aufgelösten Serienwiderstand der Solarzelle verknüpft. Hier sollte eine orts aufgelöste Bestimmung der Diodenspannung einer Solarzelle unternommen und die Möglichkeit einer daraus resultierenden Bestimmung des lokalen Serienwiderstands sondiert werden.

Drei Wege zum Mapping der orts aufgelösten Diodenspannung

Im Folgenden sollen drei Wege zu einem orts aufgelösten Spannungsmapping auf der Basis einer Kalibrierung einer gemessenen Lumineszenzintensität in Bezug auf elektronische Zelleigenschaften skizziert werden:

1. Integration der Diodenspannung in einen S, L, U – Trennungsalgorithmus
2. Kombination von LIR (luminescence intensity ratios) [17] mit einem Mapping der orts aufgelösten Diodenspannung aus einer Einzelmessung
3. Direkte Kalibrierung einzelner EL-Bilder auf die orts aufgelöste Diodenspannung U (ohne Rücksicht auf Rekombinationseigenschaften)

1. a) Diodenspannung und S, L, U – Trennungsalgorithmus – naiver Ansatz

In einem Algorithmus nach Gl. 6.13. wäre auch eine Integration weiterer elektronischer Solarzellenparameter, sowie der lokalen Diodenspannung U denkbar:

$$\chi_{j,EL}(L, S_b, U) = \sum_i (\Phi_{\lambda_i}(L, S_b, U) - \Phi_{j,\lambda_i})^2 \quad (6.15)$$

Eine zuverlässige Bestimmung der Diodenspannung auf diesem Weg ist mit weitergehenden Anstrengungen verbunden, da die Signalkontraste

$$U \frac{\partial \Phi}{\partial U} \gg S \frac{\partial \Phi}{\partial S} \geq L \frac{\partial \Phi}{\partial L}$$

in Rekombinationseigenschaften und Diodenspannung sich sehr stark unterscheiden.

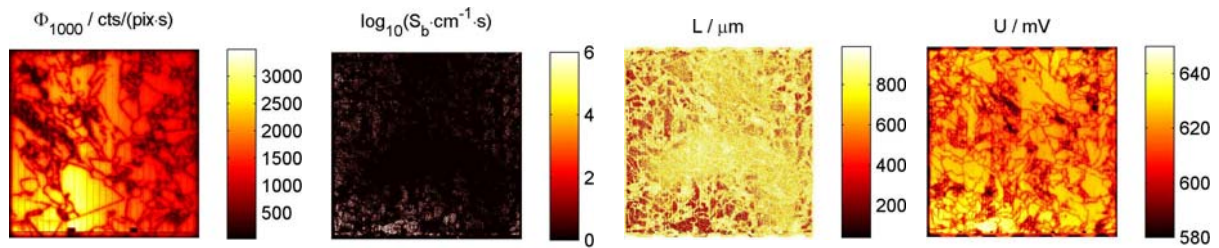


Abb. 55 Eine Bestimmung der ortsaufgelösten Diodenspannung sowie der Basis-Rekombinationseigenschaften gemäß einem um die Diodenspannung erweiterten Fehlerquadrat-Minimierungs-Algorithmus nach Gl. 6.13. scheitert hier an den sehr unterschiedlichen relativen Kontrasten. Während der starke exponentielle Kontrast in der Diodenspannung U zu einem erwarteten Messergebnis führte, kann dies aufgrund des vergleichsweise kleinen Signalkontrasts in den Rekombinationseigenschaften L und S_b dort nicht behauptet werden. Links ist eine Ortsaufgelöste Verteilung der Lumineszenzintensität mit einem 1000nm Kurzpass-Filter abgebildet.

1. b) Diodenspannung und S, L, U – Trennungsalgorithmus – differenzierter Ansatz

Der obige Ansatz auf der Basis eines Trennungsalgorithmus ist leicht zu modifizieren, sodass die stark unterschiedlichen Signalkontraste das Messergebnis nicht weiter systematisch verzerren. Dazu wird der Trennungsalgorithmus in seiner bereits bekannten Form in Gl. 6.13 zunächst verwendet, um Elektronen-Diffusionslänge L und Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit S_b zu bestimmen. Damit ist das Tiefenprofil der Überschussladungsträgerdichte $\Delta n(z)$ festgelegt, sodass nun anhand einer Einzelmessung nur noch durch die Randbedingung Gl. 6.4 die Diodenspannung bestimmbar wird.

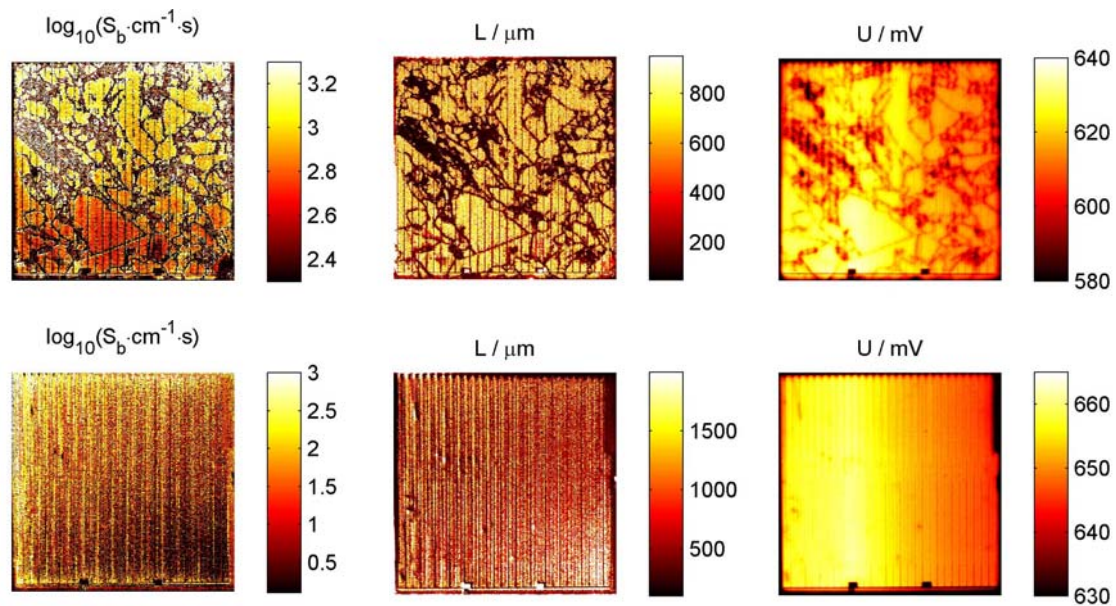


Abb. 56 Bestimmung der Rekombinationseigenschaften L und S_b sowie der orts aufgelösten Verteilung von Diodenspannungen anhand des hier beschriebenen differenzierten Trennungsalgorithmus. Oben ist das Ergebnis für eine multikristalline Solarzelle gezeigt, die auch schon für die in Abschnitt 6.2. Gezeigte Analyse verwendet wurde. Unten ist das Ergebnis für eine monokristalline Solarzelle gezeigt.

2. Mapping der Diodenspannung aus LIR & Einzelmessung

Wie aus der folgenden – auf Berechnungen auf der Basis von Gln. 6.1-6.10 basierenden – Abbildung hervorgeht, ist die exakte Berechnung der Diodenspannung durch Vergleich von Intensitätsverhältnissen (LIR) nach Würfel et al. mit gemessenen Lumineszenzintensitäten im strengen Sinn nicht möglich. Dies liegt daran, dass einem Intensitätsverhältnis nicht eineindeutig ein Paar von L, S_b -Werten – und damit ein eindeutiges Tiefenprofil der Überschussladungsträgerdichte – zugeordnet werden kann, sondern die Zuordnung allein zu einer Schar $L(S_b)$ möglich ist. Damit ist die Zuordnung $LIR \rightarrow \Phi$ zu einem Messsignal Φ im strengen Sinn nicht eindeutig. Hier soll trotzdem der Versuch unternommen werden, eine Bestimmung der orts aufgelösten Diodenspannung durchzuführen, da die relative Schwankung des einem LIR zuzuordnenden Messsignals Φ i.d.R. klein und der Signalkontrast $\partial\Phi/\partial U$ i.d.R. vergleichsweise groß ist.

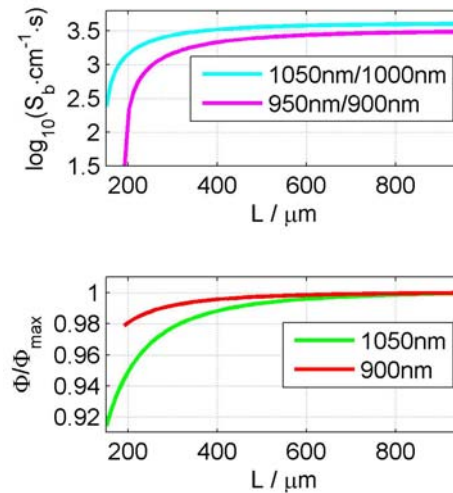


Abb. 57 Die notwendige Bedingung, dass einem LIR (nach Würfel et al.) eindeutig eine gemessene Lumineszenzintensität zugeordnet wird, ist für Solarzellen nicht erfüllt. Die Scharen konstanter LIR-Werte im Parameterraum von Elektronendiffusionslänge und Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit (oben) lassen sich nur Lumineszenzintensitäten zuordnen, die insbesondere bei kleinen Diffusionslängen nicht konstant sind (unten). Aufgrund des großen Signalkontrasts in der Diodenspannung soll trotzdem der Versuch einer Bestimmung der lokalen Diodenspannung anhand eines LIR-Map + Einzelmessung durchgeführt werden.

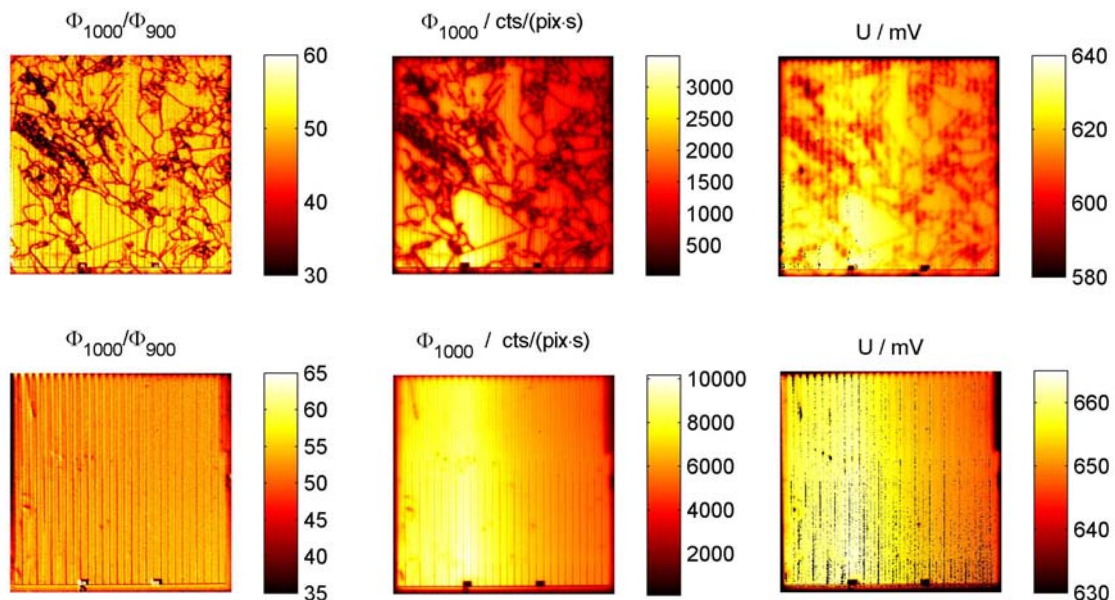


Abb. 58 Bestimmung der ortsaufgelösten Diodenspannung mittels Lumineszenz-Intensitätsverhältnissen (LIR, links) in Kombination mit einer Einzelmessung (Mitte). Aufgrund des hohen Signalkontrasts einer Einzelmessung in der Diodenspannung U ist die Übereinstimmung mit der vorher diskutierten Methode trotz theoretischen Bedenken gut.

3. Direkte Kalibrierung der Einzelmessung auf Diodenspannung

Unter der Annahme eines sehr flachen (homogenen) Tiefenprofils der Überschussladungsträgerdichte ist die Bestimmung der orts aufgelösten Diodenspannung auch ohne eine damit einhergehende Bestimmung des Tiefenprofils der Überschussladungsträgerdichte (der Rekombinationseigenschaften) – mittels einer einzigen Lumineszenzmessung – möglich. Diese Annahme ist gleichbedeutend mit der Annahme einer Elektronen-Diffusionslänge L , die deutlich größer als die Substratdicke ist, und einer Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S , die sehr viel kleiner als die thermische Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger ist. Diese Methode wurde an den beiden hier untersuchten Solarzellen getestet und mit der oben beschriebenen Methode verglichen. Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass eine Direkt-Kalibrierung auf die Diodenspannung tatsächlich umso besser funktioniert, je geringer die Rekombination ist. Die Abweichungen zwischen einer Methode, die Rekombinationseigenschaften mitberücksichtigt, sind an multikristallinem Material deutlich größer als an monokristallinem Material.

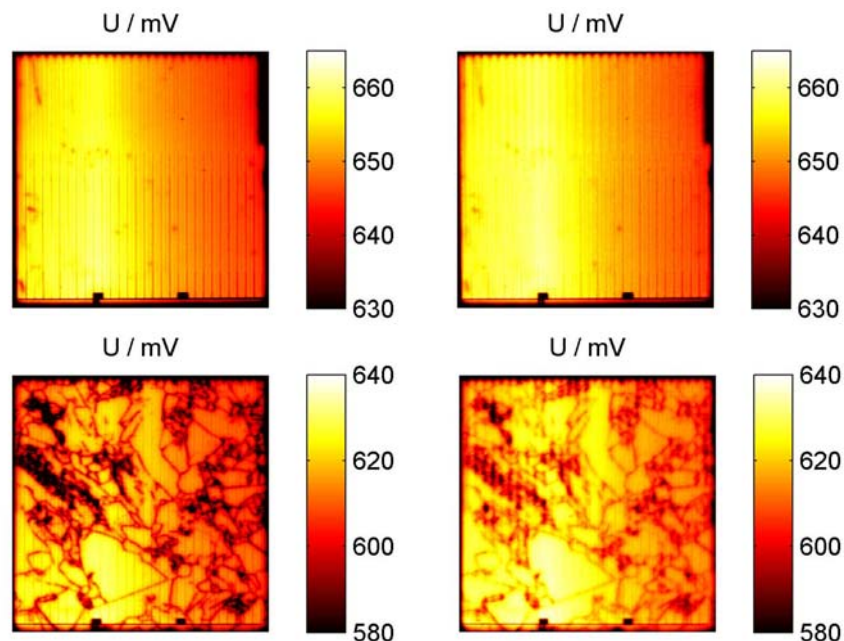


Abb. 59 Oben ist das Ergebnis einer Bestimmung der orts aufgelösten Diodenspannung an einer monokristallinen (FZ-basierten) Solarzelle mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der Rekombinationseigenschaften (unter der vereinfachenden Annahme einer über die Substrattiefe homogenen Überschussladungsträgerdichte) gezeigt. Im Flächenmittel weichen die beiden Maps um $\Delta U=1\text{mV}$ voneinander ab. Bei multikristallinem Material ist diese Abweichung größer, da man aufgrund erhöhter Störstellenrekombination von einem prononcierteren Tiefenprofil der Überschussladungsträgerdichte – selbst innerhalb homogener Körner – ausgehen muss. Allein innerhalb des relativ großen Kornes im 3. Bildquadranten kommt man im Mittel auf eine Spannungsdifferenz von $\Delta U=3.7\text{mV}$.

Herausforderungen bei der Bestimmung der absoluten orts aufgelösten Diodenspannung

a) Multi-Pin Vierpunktmessung

Bei der Bestimmung orts aufgelöster Verteilungen der Diodenspannung zwecks Serienwiderstandsbestimmung ist die Differenz

$$\Delta U_{R_s} = U_{\text{extern}} - U_{\text{diode,EL}} \quad (6.16)$$

zwischen einer extern anliegenden Spannung und der aus der Lumineszenz-Analyse abgeleiteten internen Diodenspannung die entscheidende Größe. Beide hier einfließenden Größen können fehlerbehaftet sein.

Die extern an der Zelle anliegende Durchlassspannung, die per Definition immer größer sein muss als die interne Diodenspannung (bedingt durch endlichen positiven Serienwiderstand jedes Flächenelements der Solarzelle), wurde durch ein Vierpunkt-Messverfahren (stromlos) über eine Parallelschaltung mehrerer Messpins ermittelt. Dabei konnten Querströme zwischen den parallelgeschalteten Messpins bewirken, dass die am Spannungsmessgerät anliegende externe Spannung einer geringeren als der höchsten auf der Solarzelle de facto lokal auftretenden externen Spannung entsprach. Bei kleinem Serienwiderstand war damit ein physikalisch sinnloser negativer Wert ΔU lokal messbar.

Diesem Problem sollte evtl. damit begegnet werden, dass eine Vierpunkt-Spannungsmessung nur an einem Punkt auf der Zelle – ohne eine hier verwendete und in Standard-Kontaktierungseinheiten übliche Parallelschaltung der Messpins – durchgeführt wird. Damit würden Querströme in der Parallelschaltung und die Möglichkeit einer Unterbewertung der extern anliegenden Spannung beseitigt. Die Messung der extern anliegenden Spannung sollte möglichst nahe an einem Flächenelement der Zelle erfolgen, dass eine zuverlässige Bestimmung der internen Diodenspannung aus der EL-Intensität ermöglicht.

b) Raue Oberflächen

Die Rauheit von Solarzelloberflächen stellt eines der größten nach wie vor ungelösten Probleme bei der optischen Charakterisierung dar. So beeinflusst sie auch sämtliche hier diskutierte Messverfahren.

Konkret trat im Rahmen dieses Forschungsprojekts immer wieder das Problem auf, dass an rauen (im Gegensatz zu glatten) Probenoberflächen die gemessene Lumineszenzintensität relativ höher war, als es gemäß den Referenzmessungen diverser elektronischer Kenngrößen zu erwarten gewesen wäre. So

auch im Fall der Diodenspannung. Es kursieren diverse Erklärungsmodelle für die Erhöhung der Signalintensität durch raue Probenoberflächen. Definitiv konnte bisher keines als allein gültig ausgemacht werden. Zwei sollen hier erwähnt werden:

- Lambert-Streuung – Lichtkegelaufweitung partiell unterbunden
- Möglichkeit der Auskopplung ansonsten totalreflektierten Lichts (>98% bei 17° Grenzwinkel der Totalreflexion)

Raue Probenoberflächen schließen leider nicht nur tatsächlich texturierte oder unbehandelte Substrate ein, sondern auch z.B. cp-geätzte multikristalline Wafer, deren Oberflächenmorphologie aufgrund der willkürlichen Kristallorientierung der einzelnen Körner relativ komplex sein kann. Wenn im Rahmen zumindest dieses Projekts auch keine endgültige Problemlösung in Bezug auf systematische Artefakte durch Rauheit in optischen Charakterisierungsmethoden gefunden werden konnte, so konnten Tests durchgeführt werden, um die Signalerhöhung durch Rauheit zu quantifizieren. Die hier analysierte monokristalline (FZ-basierte) Solarzelle weist eine sehr glatte Oberflächenmorphologie auf. Man kann davon ausgehen, dass sie keine rauheitsbedingten Oberflächenartefakte in ihrer spontanen Emissionsrate zeigt. Verglichen damit ist im Mikroskopbild der hier analysierten multikristallinen Solarzelle (gleiche Zellcharge) eine komplexere Oberflächenmorphologie erkennbar. Die Erhöhung der Signalintensität durch Rauheit wurde durch Vergleich von Messungen der externen Zellspannung und der emittierten EL-Intensität in unmittelbarer Nähe an beiden Zellen quantifiziert.

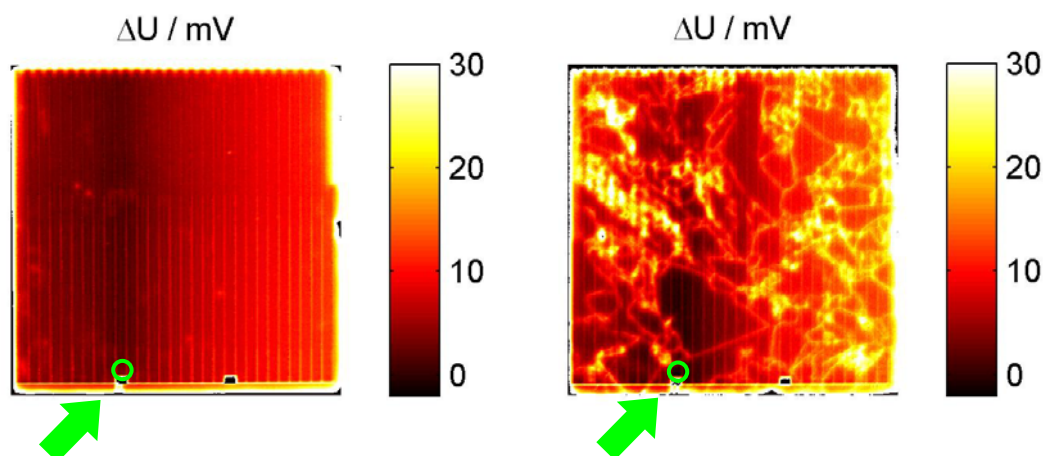


Abb. 60 Ortsaufgelöste Messung der Differenz zwischen externer Spannung der Solarzelle und interner Diodenspannung gemäß Lumineszenzintensität. Diese Spannungsdifferenz beträgt in unmittelbarer Umgebung des Spannungspins (grün markiert) bei der monokristallinen Solarzelle mit glatter Oberfläche 1mV, bei der multikristallinen Solarzelle mit einer komplexeren Oberflächenmorphologie beträgt die Spannungsdifferenz -3mV. Daraus kann man unter Annahme eines identischen Kontaktwiderstands schließen, dass bei Raumtemperatur die Lumineszenzintensität der multikristallinen Zelle um einen Faktor 1.16 erhöht ist.

Serienwiderstands-Mapping

Unter der Annahme einer homogenen Stromverteilung über die Zelle (Flächendichte des eingepprägten Stroms $j = \text{const.}$) ließe sich aus der ortsaufgelösten Abbildung der internen Diodenspannung direkt ein ortsaufgelöstes Bild des Serienwiderstands berechnen:

$$R_s = \frac{\Delta U_{R_s}}{j} \quad (6.17)$$

Das Problem bei dieser Bestimmung des Serienwiderstands ist, dass sie eine Homogenität der Diodenkennlinie über die gesamte Fläche der Solarzelle voraussetzt, die man – insbesondere im Fall multikristallinen Materials – nicht annehmen kann. Gerade an Stellen erhöhten Parallelwiderstands oder niedriger Ladungsträgerlebensdauer ist die Stromdichte lokal erhöht. Damit setzt eine korrekte Bestimmung des ortsaufgelösten Serienwiderstands streng genommen die Kenntnis der ortsaufgelösten Strom-Spannungs-Charakteristik voraus, die ihrerseits auch vom Serienwiderstand abhängt.

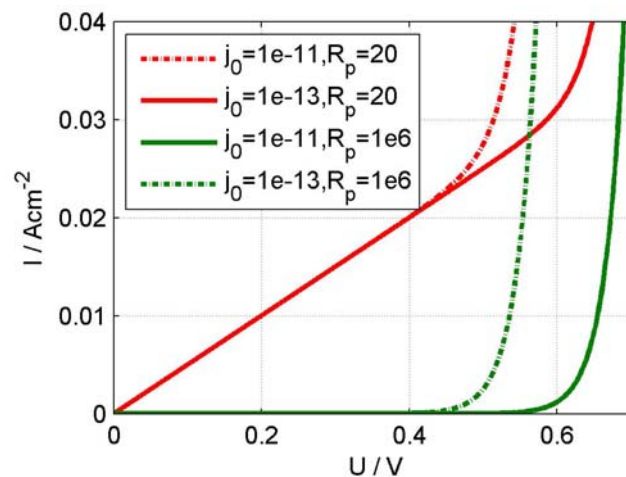


Abb. 61 Strom-Spannungs-Charakteristik als Funktion der Sättigungsstromdichte j_0 (in A/cm^2) und des Parallelwiderstands R_p (in Ωcm^2) nach einem Eindiodenmodell mit einem integrierten ohm'schen Shunt. Die lokale Stromdichte bei Aufprägung einer Durchlassspannung kann gemäß dieser Kennlinie lokal variieren. Deshalb beobachtet man insbesondere bei multikristallinem Material eine Abweichung von der Homogenität der Strom-Spannungs-Charakteristik, die eine Serienwiderstandsbestimmung schwer möglich macht.

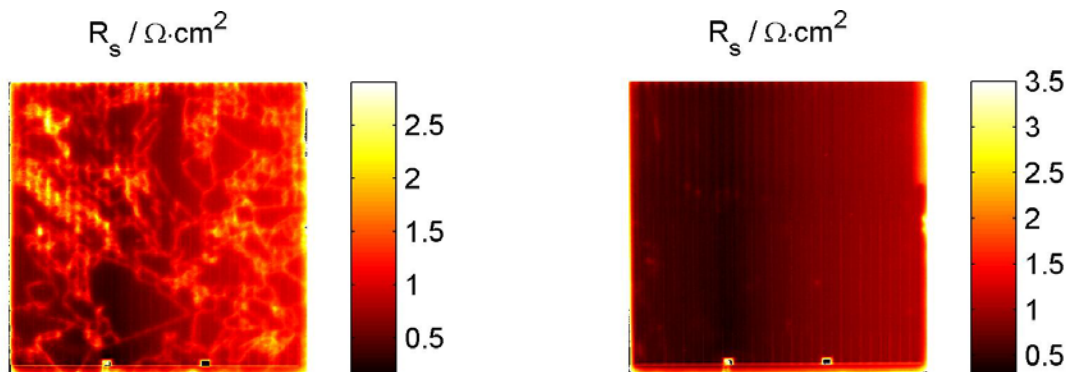


Abb. 62 Verteilung des Serienwiderstands gemäß Gl. 6.17. Da die lokale Strom-Spannungs-Charakteristik bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt ist, wird der Serienwiderstand bei lateraler Inhomogenität der Strom-Spannungs-Charakteristik (etwa durch Korngrenzen oder Shunts) in Bereichen hohen Zellstroms überschätzt und in Bereichen niedrigen Zellstroms unterschätzt. Dies ist keine physikalisch sinnvolle Abbildung des Serienwiderstands, und es bedarf weiterer Anstrengungen zur Berücksichtigung der lokalen Strom-Spannungs-Charakteristik, um den Serienwiderstand aus einer orts aufgelösten Messung der Differenz von externer Zellspannung und interner Diodenspannung zu bestimmen.

6.4 Abschätzung kleinster Lebensdauern in sägerauen Wafern mittels Photolumineszenz

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden Lumineszenzmessungen erprobt und Methoden entwickelt, um das Spektrum der Lumineszenzbasierten Qualitätskontrolle auf sägeraues, unpassiviertes Material, und damit auf die gesamte PV-Produktionskette ab dem Wafering, auszuweiten.

Die hier gewählte Darstellung ist eng angelehnt an die Darstellung in der aus diesem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichung [19], geht jedoch nicht auf alle Detailfragen ein.

Methode zur Eliminierung des Einflusses reflektierter Anregungsstrahlung in Lumineszenzmessungen

Bei relativ niedriger Materialqualität oder im Falle unpassivierter Waferoberflächen kommt es vor, dass das Verhältnis von Anregungsstrahlung und Lumineszenz derart groß wird, dass die Unterdrückung der Anregungsstrahlung gegenüber der Lumineszenz durch optische Langpassfilter für quantitative Analysen nicht ausreicht.

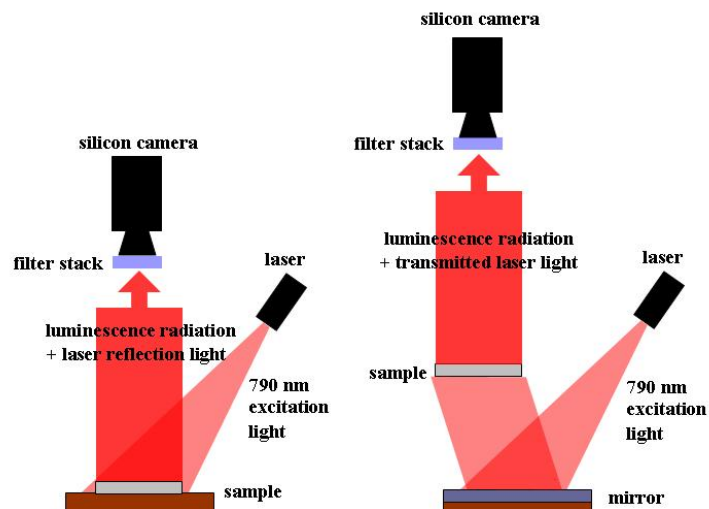


Abb. 63 Abbildung der beiden am Fraunhofer ISE für Photolumineszenzmessungen an sägerauen Wafern verwendeten Messapparaturen. Für die reflexionsseitige Detektion (links) ist hier ein Verfahren zur Eliminierung des Einflusses von Anregungsstrahlung dargelegt. Der transmissionsseitiger Detektion entsprechende Messaufbau (rechts) gewährleistet durch die Unterdrückung der Anregungsstrahlung durch die Probe selbst ein sehr viel höheres Verhältnis gemessener Lumineszenzintensität zur gemessenen Anregungsstrahlung. Dieser Aufbau ist allerdings wegen der umständlicheren Probenpositionierung weniger für eine industrielle Umgebung geeignet.

Der Verwendung einer größeren Anzahl in Reihe geschalteter Langpassfilter (sowohl Absorptionsfilter als auch dielektrische Filter) stehen diverse optische Artefakte wie etwa Interferenzeffekte, Fluoreszenz des Filtermaterials oder die Winkelabhängigkeit der Kantenwellenlänge entgegen.

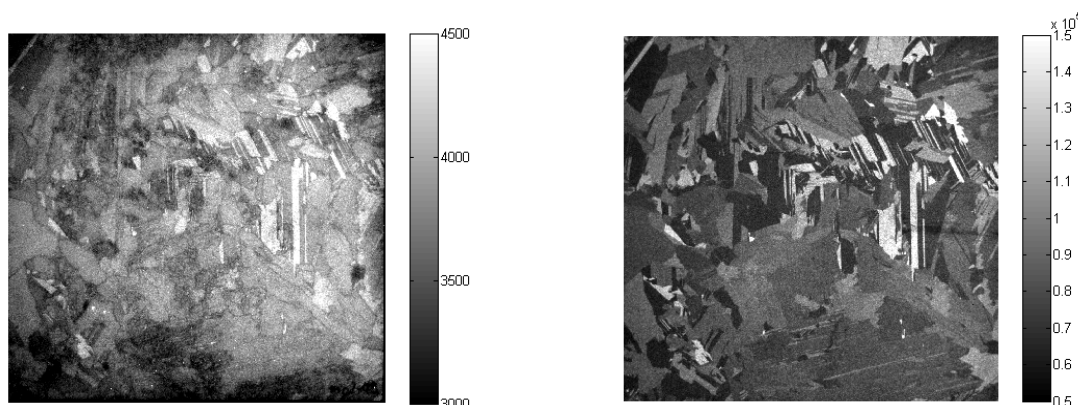


Abb. 64 Links ist eine PL-Aufnahme eines sägerauen (unpassivierten) Siliciumwafers gezeigt in reflexionsseitiger Detektion gezeigt, die von einer Reflexion von Anregungsstrahlung durch die Waferoberfläche überlagert ist. Eine Aufnahme eines Reflexionsbildes ohne Filterung der Anregungsstrahlung bei einer um ca. 5 Größenordnungen reduzierten Anregungsintensität zeigt die dazugehörige reine Reflexionstopographie (rechts).

In der Annahme, die wahre Lumineszenz-Topographie $I_{PL,corr}(x,y)$ wäre von einer Reflexionstopographie $I_{refl}(x,y)$ überlagert, die man ohne Filterung der Anregungsstrahlung messen kann, wird eine Korrektur der gemessenen Lumineszenz-Topographie $I_{PL,meas}(x,y)$ durch die Bestimmung eines Skalierungsfaktors α folgendermaßen möglich:

$$I_{PL,corr}(x,y) = I_{PL,meas}(x,y) - \alpha \cdot I_{refl}(x,y) \quad (6.18)$$

Die Bestimmung des Skalierungsfaktors α erfolgt durch Wahl eines oder mehrerer Paare geeigneter Gebiete. Jedes Paar geeigneter Gebiete besteht aus zwei jeweils benachbarten Bereichen relativ hoher und relativ niedriger Lumineszenzintensität. Gemessene Intensitäten werden im Folgenden mit hochgestellten Indizes *dark* und *bright* zur Identifizierung des jeweils dunklen und hellen Bereichs, sowie mit tiefgestellten Indizes *PL,meas* für gemessene Lumineszenz (inkl. Überlagerung durch Reflexion), *PL,corr* für reine, um Reflexion korrigierte, Lumineszenz, und *refl* für Reflexion ausgezeichnet. Nach obiger Annahme muss dann gelten:

$$\frac{I_{PL,meas}^{bright} - I_{PL,corr}^{bright}}{I_{PL,meas}^{dark} - I_{PL,corr}^{dark}} = \frac{I_{refl}^{bright}}{I_{refl}^{dark}} \quad (6.19)$$

Damit ist der Skalierungsfaktor α bestimmbar zu:

$$\alpha = \frac{I_{PL,meas}^{bright} - I_{PL,corr}^{bright}}{I_{refl}^{bright}} = \frac{I_{PL,meas}^{dark} - I_{PL,corr}^{dark}}{I_{refl}^{dark}} \quad (6.20)$$

Dieser Skalierungsfaktor ist ausschließlich von Eigenschaften des Messaufbaus, und nicht von individuellen Probeneigenschaften abhängig. Damit ist er einmalig als fester, zu einem Messaufbau gehöriger Parameter bestimmbar.

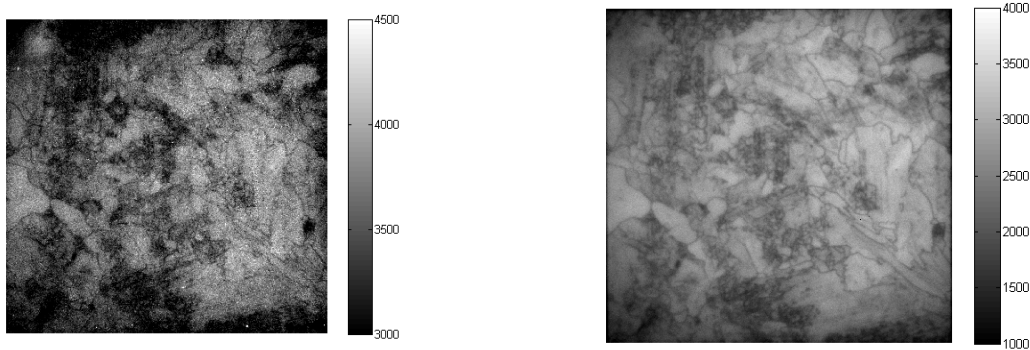


Abb. 65 Links: Korrektur der Photolumineszenz-Topographie im Modus reflexionsseitiger Detektion. Deutlich sind im Vergleich zu Abb. 64 links keine Reflexions-Features mehr erkennbar. Rechts: Lumineszenzbild im Modus transmissionsseitiger Detektion. Zu beachten ist hier, dass die Skalierung der Bilder nicht identisch ist.

Abschätzung kleinster Lebensdauern in sägerauen Wafern

Die vergleichsweise sehr geringe Lumineszenzintensität sägerauer / unpassivierter Wafer gegenüber vergleichbaren passivierten Wafern stellt eine gravierende Limitierung dar, da sie erstens das Signal-Rausch-Verhältnis einer Messung bei gegebener Belichtungszeit dramatisch verschlechtert und da sie zweitens in die Größenordnung von Messartefakten wie Filterfluoreszenz oder reflektierter Anregungsstrahlung gerät.

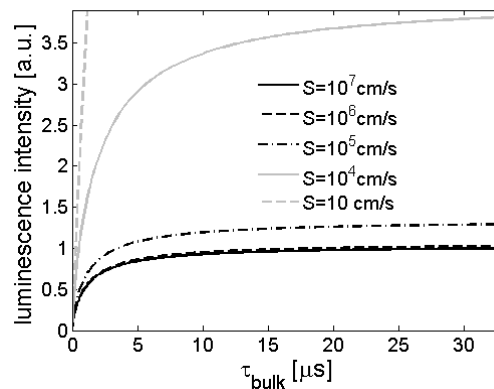


Abb. 66 Modellierte Lumineszenzintensität gemäß Gln. 6.1-6.10 als Funktion der Volumenlebensdauer $\tau_{\text{bulk}}=L^2/D$ bei verschiedenen Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten (symmetrisch, vorne und hinten gleich). Deutlich sichtbar ist die Sättigung der Lumineszenzintensität schon bei Volumenlebensdauern im Bereich von $10\mu\text{s}$, bei typischen Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten sägerauer Wafer von $\sim 5 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$.

Jedoch hat diese geringe Lumineszenzintensität auch einen Vorteil, nämlich die Möglichkeit einer Abschätzung kleiner Volumenlebensdauern innerhalb eines sägerauen Wafers mittels Photolumineszenz-Imaging. Dies liegt an der durch Oberflächenrekombination bedingten schnellen Sättigung der Lumineszenzintensität als Funktion der Volumenlebensdauer bei kleinen Volumenlebensdauern. Diese Sättigung kann verwendet werden, um durch Verhältnisse gemessener Lumineszenzsignale im gesättigten (hohe Volumenlebensdauer, *saturation*) und ungesättigten (niedrige Volumenlebensdauer, *estimation*) Bereich auf die Lebensdauer im ungesättigten Bereich zu schließen:

$$\frac{I_{PL,high}}{I_{PL,low}} = \frac{I_{PL,saturation}}{I_{PL,estimation}} \quad (6.21)$$

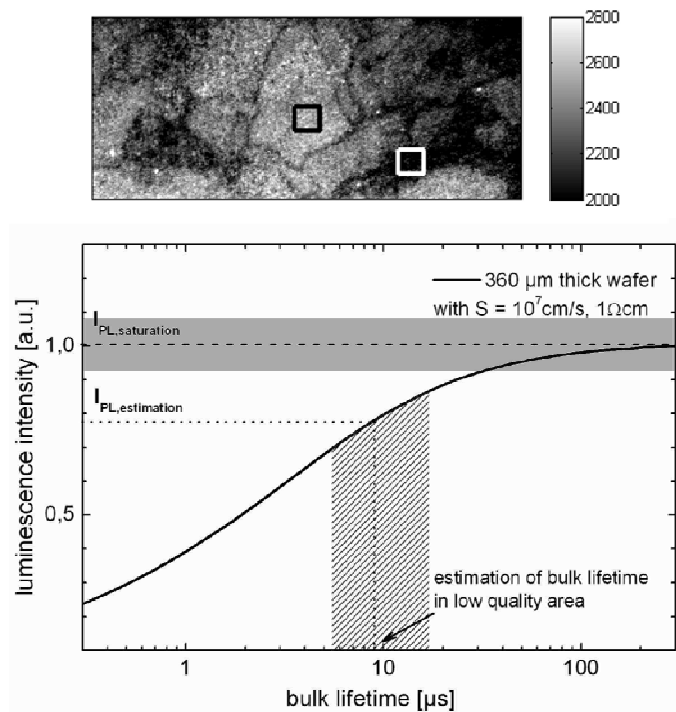


Abb. 67 Abschätzung der Volumenlebensdauer über das Verhältnis der Lumineszenzintensität im gesättigten Bereich (saturation) vs. interessierenden Bereich (estimation). Durch Modellierung der Lumineszenzintensität als Funktion der Volumenlebensdauer bei quasi unendlich rekombinativer Oberfläche (gemäß Gln. 6.1.-6.10) kann dem Intensitätsverhältnis eine Volumenlebensdauer im interessierenden Bereich zugeordnet werden. Dies ist potentiell interessant für die Eingangs-Qualitätskontrolle in der Solarzellenfertigung, in der Schwellwerte der Volumenlebensdauer als Ausschusskriterium für die Zellproduktion zu einer Senkung der Kosten pro erzeugter Energieeinheit führen können.

Experimentelle Untersuchungen zur Aussagefähigkeit von Messungen an as-cut-Wafern

Mit dem folgenden Versuchsablauf wurde eine Untersuchung der Relevanz von Messungen an as-cut-Wafern, z.B. als Eingangskontrolle in der Produktion, für die Solarzellenergebnisse durchgeführt:

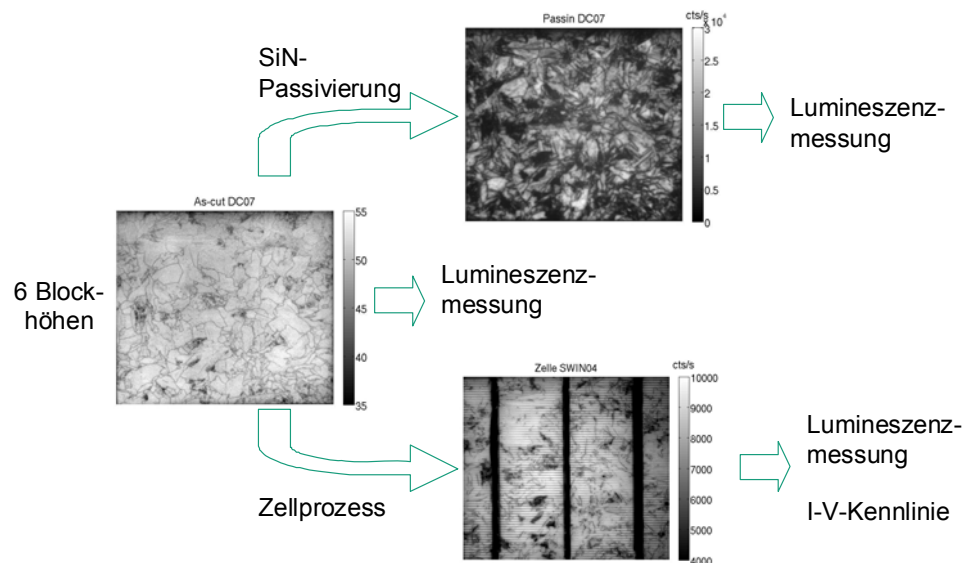


Abb. 68 Versuchsschema

Es wurden jeweils 4 parallele as-cut Wafer aus 6 verschiedenen Höhenpositionen vermessen, die sich vom Bodenbereich bis zur Kappe erstrecken. Zu jeder Höhenposition wurden für zwei benachbarte Zellen die Solarzellenparameter bestimmt. Die Zellen aus dem Bodenbereich zeigten die geringsten Wirkungsgrade (14,1 – 14,2 %) gefolgt von den Zellen aus der Kappe (14,6 - 14,8 %). Die Wirkungsgrade der Zellen aus den restlichen Höhenpositionen lagen wesentlich höher (15,8 - 15,9 %), zeigten aber untereinander keine wesentlichen Unterschiede auf. In Boden und Kappe sind jeweils Voc und Jsc erniedrigt, die Füllfaktoren nur geringfügig. Entsprechend zeigten die Dunkelkennlinien hier erhöhte I01-Werte (Rekombinationsverluste).

Die Lumineszenzmessungen der as-cut Wafer wurden unter Rückseitenbeleuchtung aufgenommen. Aus der Abbildung der Waferfläche von 156 x 156 mm² auf dem Sensor der Silizium CCD-Kamera resultiert eine Ortsauflösung von ca. 150 μ m. Für einen quantitativen Vergleich der Messungen wurde das arithmetische Mittel des Kamerasignals über die Waferfläche gebildet.

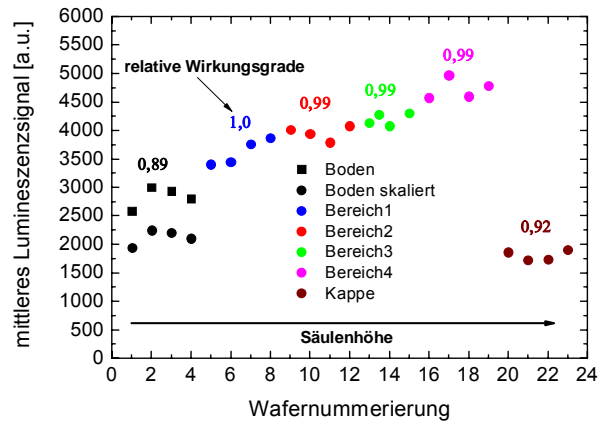


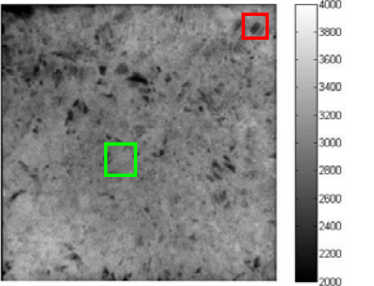
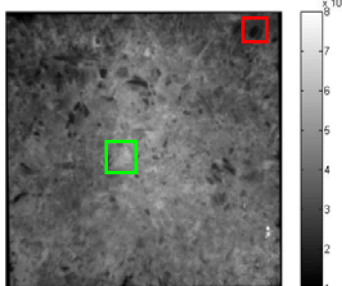
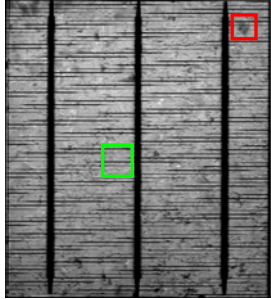
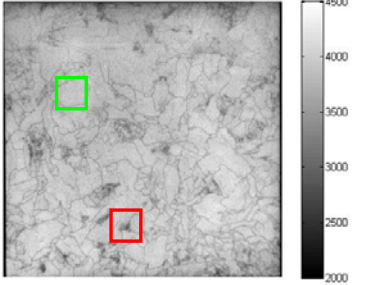
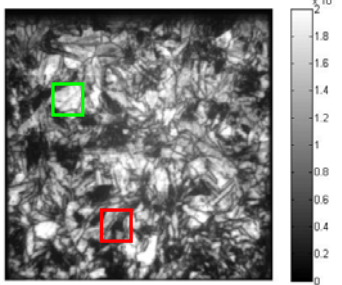
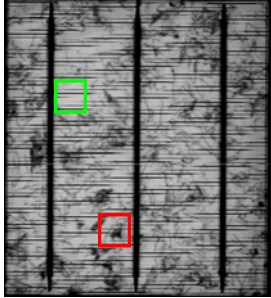
Abb. 69 Über die Waferfläche gemitteltetes Kamerasignal der as-cut Wafer aus den 6 verschiedenen Höhenpositionen.

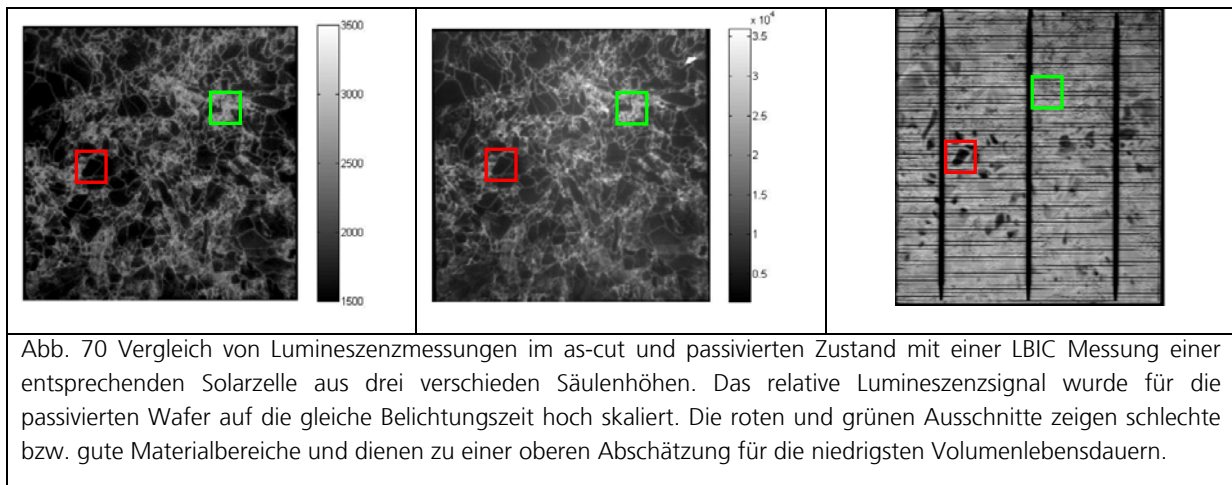
Das Lumineszenzsignal ist für Boden- und Kappenbereich signifikant schwächer als für die Wafer aus dem mittleren Bereich des Ingots. Der Sprung in der Signalintensität ist vom Boden- zum Mittelbereich geringer, aber auch hier sehr deutlich über der Streuung zwischen den Werten innerhalb der Gruppen.

Die aus den üblichen Materialeigenschaften erwartete kleinkristalline Struktur im Bodenbereich sowie Segregationshöfe um die Korngrenze im Kappenbereich sind erkennbar, mittlere Höhenbereiche weisen deutlich höhere Lebensdauern auf. Die qualitative Korrelation mit den deutlich erniedrigten Wirkungsgraden der entsprechenden Zellen ist gut nachweisbar. Der niedrigere Wirkungsgrad der Zellen aus dem Boden- gegenüber denen aus dem Kappenbereich ist in den gemittelten PLI-Intensitäten (entsprechend den Lebensdauern) der Ausgangswafer nicht repräsentiert. Die mittlere Lumineszenzintensität der Wafer des Bodenbereichs ist gegenüber dem Kappenbereich tendenziell eher etwas höher. Auch bei den passivierten Proben sind die Wafer aus der Kappe schlechter als die aus dem Boden. Bei den hier vorliegenden Defekten muss daher der Schluss gezogen werden, dass eine exakte Voraussage der Zellperformance nicht möglich ist.

Die Differenzen zwischen dem Verhalten in Boden- und Kappenbereich lassen sich so interpretieren, dass die durch Segregation bei der Kristallisierung erhöhten Metallkonzentrationen im Kappenbereich durch den Solarzellenprozess stärker verbessert werden als die vermutlich eher durch Ausscheidungen bestimmten Lebensdauern im Bodenbereich. Im Kappenbereich sind auch bei den Messungen an den as-cut-Wafern sehr schön Segregationshöfe um die Korngrenzen erkennbar. In den LBIC-Bilder an den Solarzellen sind hier tatsächlich großflächige Verbesserungen der Körner zu beobachten. Beim Vergleich mit den Zellergebnissen wird deutlich, dass eindeutig die Materialquali-

tät als Ursache für die reduzierten Spannungs- und Stromwerte der Zellen im Boden- und Kappenbereich nachgewiesen werden kann. Aus dem Vergleich der PLI Messungen von as-cut Wafern aus verschiedenen Höhenbereichen mit LBIC Messungen der zugehörigen Zellen können detaillierte Zusammenhänge untersucht werden. In allen Höhenbereichen treten identische Kornstrukturen zwischen PLI und LBIC auf, Bereiche, in denen der materialbedingte Kontrast durch den Solarzellenprozess nahezu unverändert geblieben ist. Es finden sich aber viele Bereiche in denen dunkle Körner oder Korngrenzen in den PLI-Bildern in den LBIC Messungen entweder überhaupt nicht wieder zu finden sind oder stark reduziert auftreten. Besonders im Kappenbereich ist zu beobachten, dass die flächige Erniedrigung der Lebensdauer innerhalb der Körner zum größten Teil verschwunden ist.

PLI as-cut	PLI CP geätzt + Passin	LBIC fertige Zelle
Boden DC_03 120s 	Boden DC_03 auf 120s skaliert 	Boden 
Bereich 1 DC_07 90s 	Bereich 1 DC_07 auf 90s skaliert 	Bereich 1 
Kappe DC_22 90 s	Kappe DC_22 auf 90s skaliert	Kappe



Die Solarzellen im Höhenbereich 1-4 zeigen gleichen Wirkungsgrad, wohingegen die Lumineszenzintensität der Wafer kontinuierlich ansteigt. Dies lässt sich quantitativ daraus erklären, dass das Lumineszenzsignal proportional zu Dotierung und Überschussladungs-trägerdichte ist. Man kann den Dotierungsverlauf $N_A(x)$ über die Blockhöhe x ($x=0$ ist Blockboden, $x=1$ ist Blockkappe) mit der sogenannten Scheil Gleichung modellieren:

$$N_A(x) = N_A(0) \cdot (1-x)^{K_{eff}-1} \quad (6.22)$$

$$K_{eff} = \frac{C(B)_{solid}}{C(B)_{liquid}} = 0,8$$

Als Segregationskoeffizient für Bor (Verhältnis aus Bor-Konzentration in fester Phase $C(B)_{solid}$ zu Konzentration in flüssiger Phase $C(B)_{liquid}$) wurde mit 0,8 ein Wert aus der Literatur genommen. In der folgenden Abbildung wurde die Scheil Gleichung an die Lumineszenzsignale der 4 mittleren Blockhöhen angefitet (dabei wurde jeweils der Mittelwert der 4 Wafer jeder Blockhöhe verwendet):

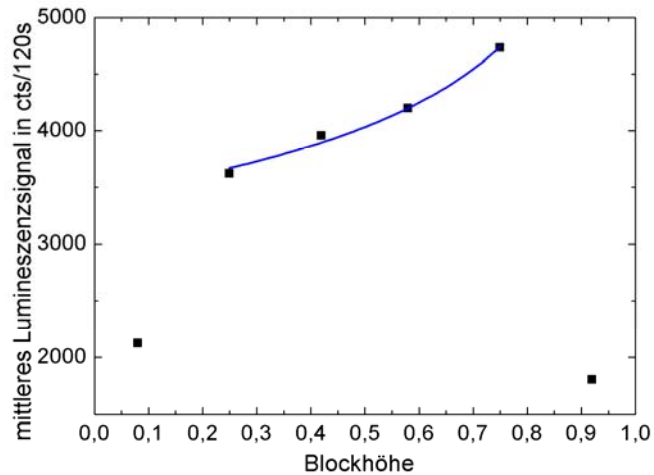


Abb. 71 Fit der Scheilgleichung an die gemessenen Lumineszenzsignale im mittleren Höhenbereich.

Es zeigt sich, dass der Anstieg sich entsprechend der Scheilgleichung verhält. Weiterhin zeigten induktive Messungen der Dotierung mittels QSSPC (quasi steady state photoconductance) einen Anstieg der Dotierung im mittleren Bereich von 27%. Beide Befunde belegen, dass der Lumineszenzanstieg von 31% in diesem mittleren Bereich, aufgrund der Erhöhung der Dotierung erklärt werden kann.

Um den Informationsgehalt der as-cut Lumineszenzmessungen genauer zu untersuchen, wurden die Proben schadensgeätzt und SiN passiviert. Mit diesen Proben kann aufgrund vernachlässigbarer Oberflächenrekombination (FZ Referenzproben haben $S=10\text{cm/s}$) eine Kalibrierung auf absolute Lebensdauern mit der Methode von Giesecke et al [16] erfolgen. Wendet man nun auch auf die as-cut Proben die Lebensdauerkalibrierung an und nimmt eine maximal schlechte Oberfläche mit $S=1\text{E}6\text{ cm/s}$ an, so zeigt sich dass für die niedrigen Lebensdauern im Boden- und Kappenbereich der Informationsgehalt identisch ist. Die höheren Lebensdauern im mittleren Bereich lassen sich im as-cut Zustand jedoch nicht absolut kalibrieren.

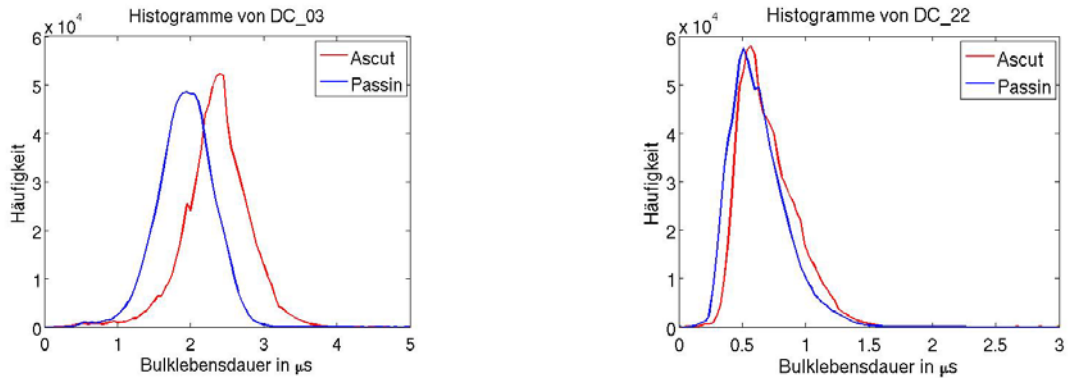


Abb. 72 Histogramme der Bulklebensdauern von Wafern aus dem Bodenbereich (links) und dem Kappenbereich (rechts). Eine gute Übereinstimmung von Messungen im ascut und im passivierten Zustand (passin) ist zu erkennen.

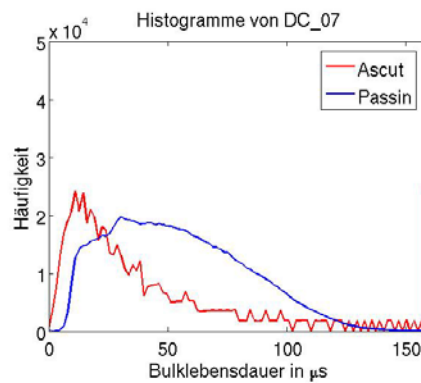


Abb. 73 Histogramm der Bulklebensdauer eines Wafers aus dem mittleren Blockbereich. Während eine quantitative Berechnung absoluter Bulklebensdauern im passivierten Zustand möglich ist, kann dies für ascut Proben aufgrund der hohen Oberflächenrekombination nicht erfolgen.

Dies ist der Tatsache geschuldet, dass das Lumineszenzsignal für $S=1\text{E}6$ cm/s schon bei Bulklebensdauern $>20\mu\text{s}$ in Sättigung geht. Eine Signalerhöhung von 42 auf 43 cts/s bringt eine Lebensdauererhöhung von 40 auf $100\mu\text{s}$ mit sich. Schon kleinste Messunsicherheiten verfälschen somit die Messung. Im passivierten Zustand mit $S=10$ cm/s steigt die Lumineszenzintensität dahingegen linear mit der Bulklebensdauer an, was eine zuverlässige Kalibrierung auf absolute Lebensdauern ermöglicht.

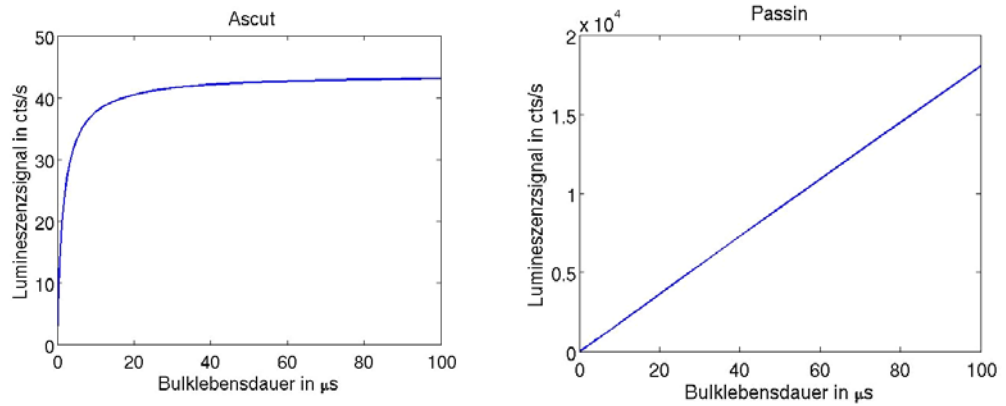


Abb. 74 Vergleich der simulierten Lumineszenzsignale in Abhängigkeit von der Volumenlebensdauer für as-cut und oberflächenpassivierte Wafer.

Es wurde somit gezeigt, dass die Bestimmung der absoluten Lebensdauer aus as-cut Lumineszenzbildern für Material mit niedrigen Bulklebensdauern funktioniert, jedoch bei Bulklebensdauern $>20\mu\text{s}$ nicht mehr möglich ist. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die gleichbleibende Materialqualität, die im Zellprozess in konstanten V_{oc} Werten zum Vorschein kommt, auch mit der as-cut Lumineszenzcharakterisierung bestimmt werden kann, sofern man Dotierungsvariationen mit berücksichtigt.

Bei der Fortsetzung dieser Arbeiten in dem inzwischen begonnenen Projekt QUASSIM konnte durch eine Erweiterung der Auswertung von PL-Messungen an as-cut-Wafern eine wichtige Korrelation festgestellt werden [20]. Ermittelt man für die dort untersuchten Wafer den Anteil der Waferfläche mit kleinen Lebensdauern (defektreiche Gebiete), was ja nach den hier erzielten Ergebnissen gut möglich ist, so kann man dafür eine Korrelation mit dem erzielten Wirkungsgrad herstellen. Eine aussagefähige Wertung erfordert somit als einen weiteren Schritt eine dort entwickelte Methode zur Erkennung dieser besonders hochrekombinationsaktiven Gebiete.

Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

W. Kwapil, M. Kasemann, J. Ebser, S. Rein, W. Warta, Application of Illuminated Lock-In Thermography to Industrial Silicon Solar Cells, Proceedings of the 22rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan (2007), p. 1596

M. Spitz, U. Belledin, S. Rein, Fast Inductive Inline Measurement of the Emitter Sheet Resistance in Industrial Solar Cell Fabrication, Proceedings of the 22rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan (2007), p. 47

T. Trupke, R.A. Bardos, M.D. Abbott, P. Würfel, E. Pink, Y. Augarten, F.W. Chen, K. Fisher, J.E. Cotter, M. Kasemann, M. Rüdiger, S. Kontermann, M.C. Schubert, M. The, S.W. Glunz, W. Warta, D. Macdonald, J. Tan, A. Cuevas, J. Bauer, R. Gupta, O. Breitenstein, T. Buonassisi, G. Tarnowski, A. Lorenz, H.P. Hartmann, D.H. Neuhaus, J.M. Fernandez, Progress With Luminescence Imaging for the Characterisation of Silicon Wafers and Solar Cells, Proceedings of the 22rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan (2007), p. 22

M. Kasemann, M.C. Schubert, W. Kwapil, M. The, B. Walter, J. Giesecke, S. Kontermann, W. Warta, S. Glunz, B. Michl, H. Nagel, P. Würfel, Y. Augarten, H. Kampwerth, E. Pink, R. Bardos, T. Trupke, J.-M. Wagner, J. Bauer, A. Lotnyk, H. Blumtritt, O. Breitenstein, A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll. *Progress in silicon solar cell characterization with infrared imaging methods*. Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia (2008), p. 965 (Plenarvortrag)

D. Grote, M. Hermlle, E. Wotke, U. Belledin, M. Hörteis, M. Spitz, M. Kasemann, S. Rein, D. Biro, W. Warta, Analyzing the Effects of Laterally Varying Emitter Sheet Resistance in Combination With Contact Resistance Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia (2008), p. 305

B. Walter, M. Kasemann, D. Grote, J. Ebser, W. Kwapil, W. Warta, Verification of Power Loss Mechanisms Contributing to the Illuminated Lock-In Thermography (ILIT) Signal, Proceedings of the 23rd EU PVSEC, Valencia, (2008), p. 310

B. Michl, M. Kasemann, J. Giesecke, M. Glatthaar, A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll, S. Rein, W. Warta, H. Nagel. *Application of luminescence imaging based series resistance measurement methods in an industrial environment*, Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia (2008), p. 1167

M. The, J. Giesecke, M. Kasemann, W. Warta, Spatially Resolved Characterisation of Silicon As-cut Wafers with Photoluminescence Imaging, Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia (2008), p. 441

J. Giesecke, M. Kasemann, B. Michl, M. The, M.C. Schubert, W. Warta, P. Würfel. *Determination of Minority Carrier Diffusion Lengths in Silicon Solar Cells from Photoluminescence Images*, Proceedings of the 23rd EU PVSEC, Valencia, (2008), p.453

M. Kasemann, W. Kwapil, M.C. Schubert, H. Habenicht, B. Walter, M. The, S. Kontermann, S. Rein, O. Breitenstein, J. Bauer, A. Lotnyk, B. Michl, H. Nagel, A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll, T. Trupke, Y. Augarten, H. Kampwerth, R.A. Bardos, S. Pingel, J. Berghold, W. Warta, S. Glunz. *Spatially resolved silicon solar cell characterization using infrared imaging methods*. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (2008) (Plenarvortrag)

J.A. Giesecke, M. Kasemann, W. Warta. *Separation of Recombination Properties of Silicon Solar Cells and Wafers via Luminescence Imaging*, Proceedings of the 24th EU PVSEC, Hamburg (2009), p. 22

J. Giesecke, *Messung von Minoritätsladungsträger-Diffusionslängen in Siliciumsolarzellen mit Lumineszenzmethoden*, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 2008

<http://kops.uni-konstanz.de/volltexte/2009/7898/>

M. Kasemann, B. Walter, C. Meinhardt, J. Ebser, W. Kwapil, and W. Warta, Emissivity-Corrected Power Loss Calibration for Lock-in Thermography Measurements on Silicon Solar Cells, *Journal of Applied Physics* **103**, 2008, p.: 113503

J.A. Giesecke, M. The, M. Kasemann, W. Warta. *Spatially Resolved Characterization of Silicon As-Cut Wafers with Photoluminescence Imaging*, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **17**, 217, 2009.

J.A. Giesecke, M. Kasemann, W. Warta. *Determination of Local Minority Carrier Diffusion Lengths in Crystalline Silicon from Luminescence Images*, *Journal of Applied Physics*, **106**, 014907, 2009.

J.A. Giesecke, M. Kasemann, M.C. Schubert, P. Würfel, W. Warta. *Separation of Local Bulk and Surface Recombination in Crystalline Silicon from Luminescence Reabsorption*, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **18**, 10, 2009.

Literaturverzeichnis

- [1] E. Rüländ, P. Fath, T. Pavelka, A. Pap, K. Peter, and J. Mizsei, Comparative study on emitter sheet resistivity measurements for inline quality control, In Proc. Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (2003)
- [2] J. Isenberg, D. Biro, W. Warta, Fast and spatially resolved measurement of sheet resistance by infrared method, Prog. in Photovoltaics 12(7), (2004) p. 539-552
- [3] A. S. H. van der Heide, J. H. Bultman, J. Hoomstra, A. Schönecker, G. P. Wyers, and W. C. Sinke, Optimizing the front side metallization process using the Corescan, In Proc. Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaics Specialists Conference (2002) S. 340
- [4] D. Grote, M. Hermle, E. Wotke, U. Belledin, M. Hörteis, M. Spitz, M. Kasemann, S. Rein, D. Biro, W. Warta, Analyzing the Effects of Laterally Varying Emitter Sheet Resistance in Combination With Contact Resistance Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia (2008), p. 305
- [5] W. Kwapil, M. Kasemann, J. Ebser, S. Rein, W. Warta, Application of Illuminated Lock-In Thermography to Industrial Silicon Solar Cells, Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan (2007), p. 1596
- [6] M. Spitz, U. Belledin, S. Rein, Fast Inductive Inline Measurement of the Emitter Sheet Resistance in Industrial Solar Cell Fabrication, Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan (2007), p. 47
- [7] K. Ramspeck, P. Altermatt, N. P. Harder, and R. Brendel, Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, (2006) p. 1471
- [8] B. Walter, M. Kasemann, D. Grote, J. Ebser, W. Kwapil, W. Warta, Verification of Power Loss Mechanisms Contributing to the Illuminated Lock-In Thermography (ILIT) Signal, Proceedings of the 23rd EU PVSEC, Valencia, (2008), p. 310
- [9] M. Kasemann, B. Walter, C. Meinhardt, J. Ebser, W. Kwapil, and W. Warta, Emissivity-Corrected Power Loss Calibration for Lock-in Thermography Measurements on Silicon Solar Cells, Journal of Applied Physics **103**, 2008, p.: 113503
- [10] M. Kasemann, W. Kwapil, M.C. Schubert, H. Habenicht, B. Walter, M. The, S. Kontermann, S. Rein, O. Breitenstein, J. Bauer, A. Lotnyk, B. Michl, H. Nagel, A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll, T. Trupke, Y. Augarten, H. Kamp-

- werth, R.A. Bardos, S. Pingel, J. Berghold, W. Warta, S. Glunz. *Spatially resolved silicon solar cell characterization using infrared imaging methods*. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (2008) (Plenarvortrag)
- [11] M. Kasemann, M.C. Schubert, W. Kwapil, M. The, B. Walter, J. Giesecke, S. Kontermann, W. Warta, S. Glunz, B. Michl, H. Nagel, P. Würfel, Y. Augarten, H. Kampwerth, E. Pink, R. Bardos, T. Trupke, J.-M. Wagner, J. Bauer, A. Lotnyk, H. Blumtritt, O. Breitenstein, A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll. *Progress in silicon solar cell characterization with infrared imaging methods*. Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference (2008), p.965
- [12] D. Hinken, K. Ramspeck, K. Bothe, B. Fischer, R. Brendel. *Series resistance imaging of solar cells by voltage dependent electroluminescence*. Applied Physics Letters 91 (2007), Nr. 182104
- [13] K. Ramspeck, K. Bothe, D. Hinken, B. Fischer, J. Schmidt, R. Brendel. *Recombination current and series resistance imaging of solar cells by combined luminescence and lock-in thermography*. Applied Physics Letters (2007), Nr. 153502
- [14] T. Trupke, E. Pink, R.A. Bardos, M.D. Abbott. *Spatially resolved series resistance of silicon solar cells obtained from luminescence imaging*. Applied Physics Letters 90 (2007), Nr. 093506
- [15] H. Kampwerth, T. Trupke, J. Weber, Y. Augarten. *Advances in luminescence based series resistance imaging on silicon solar cells*. Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference (2008), Nr. 1CV.1.39
- [16] J.A. Giesecke, M. Kasemann, W. Warta. *Determination of Local Minority Carrier Diffusion Lengths in Crystalline Silicon from Luminescence Images*, Journal of Applied Physics, **106**, 014907, 2009.
- [17] Würfel et al., *Journal of applied Physics*, **101**, 123110, 2007
- [18] J. Giesecke, M. Kasemann, M.C. Schubert, P. Würfel, W. Warta. *Separation of Local Bulk and Surface Recombination in Crystalline Silicon from Luminescence Reabsorption*, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **18**, 10, 2009
- [19] J.A. Giesecke, M. The, M. Kasemann, W. Warta. *Spatially Resolved Characterization of Silicon As-Cut Wafers with Photoluminescence Imaging*, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **17**, 217, 2009
- [20] J. Haunschild, M. Glatthaar, W. Kwapil, S. Rein, *Comparing Luminescence Imaging with Illuminated Lock-In Thermography and Carrier Density Imaging for Inline Inspection of Silicon Solar Cells*, Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg (2009), p. 857